

Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería térmica y fluidos



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Sistemas de refrigeración alternativos en zonas aisladas

Autor: Pablo Gonzalo Sastrón Toledo

Tutor: Ulpiano Ruiz Rivas

*“Muchos años después,
frente al pelotón de fusilamiento,
el coronel Aureliano Buendía había de recordar aquella tarde remota en que su padre
lo llevo a conocer el hielo”
Cien Años de Soledad*

Resumen

El principal propósito de este trabajo es el estudio de las distintas tecnologías que pueden posibilitar la refrigeración en situaciones o entornos aislados. Desde el punto de vista de los distintos usos para los que se requiere la refrigeración, se describen y explican las tecnologías competentes y en uso y se comparan en función de unos parámetros comunes. Además, se realiza un breve caso de estudio para mostrar cómo llevar a cabo el correcto dimensionamiento del sistema de refrigeración propuesto en ese apartado.

La idea del trabajo surge a raíz de la conexión entre distintas asignaturas de la especialización de energías del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales tales como Sistemas Térmicos y Energías renovables. Al fusionar ambas surgen alternativas muy atractivas e interesantes relacionadas con la refrigeración y la fuente de energía usada para llevarla a cabo.

El análisis de las diferentes tecnologías se centra en diversos aspectos tales como la madurez de las mismas, su implantación en escenarios reales, su accesibilidad por parte de la población, su posición en el mercado y con ello, su coste y su nivel de competitividad; o su impacto medioambiental. Con ello se pretende dar una visión completa de cada tecnología, con sus ventajas y desventajas, y del ámbito en el que suelen operar.

El trabajo tiene un enfoque que gira en torno a la aplicación de estas tecnologías en países subdesarrollados debido al gran desabastecimiento existente de energía eléctrica en zonas rurales subdesarrolladas y con ello, de refrigeración. Por lo tanto, los aspectos que hacen de una tecnología que sea apropiada al contexto en el que opera, son de vital importancia. Además, se estudian diversas aplicaciones prácticas de implantación de tecnologías de refrigeración alternativas en países subdesarrollados para así dar una mayor perspectiva y no estudiar solo la teoría de los distintos tipos de refrigeración alternativa.

Índice

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 4 |
| Índice | 5 |
| Índice de figuras..... | 7 |
| Índice de tablas | 9 |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.1. Introducción a la refrigeración | 11 |
| 1.2. Refrigeración en zonas aisladas..... | 14 |
| 1.3. Problema energético | 16 |
| 1.4. Efectos medioambientales | 17 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE | 21 |
| 2.1. Principales ciclos y mecanismos de refrigeración..... | 22 |
| 2.1.1. Evaporación..... | 22 |
| 2.1.2. Fusión..... | 24 |
| 2.1.3. Ciclo de compresión de vapor..... | 25 |
| 2.1.4. Absorción y adsorción..... | 27 |
| 2.1.5. Termoelectricidad | 31 |
| 2.2. Principales tecnologías de refrigeración | 33 |
| 2.2.1. Refrigeración pasiva | 33 |
| 2.2.1.1. Sistemas evaporativos Pot In Pot..... | 35 |
| 2.2.1.2. Sistemas de refrigeración por fusión | 37 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2. Refrigeración activa | 38 |
| 2.2.2.1. Sistemas de absorción y adsorción | 39 |
| 2.2.2.2. Sistemas termoelectricos Peltier | 46 |
| 2.2.2.3. Sistemas de compresión mecánica | 48 |
| CAPÍTULO 3. COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS EN FUNCIÓN DEL USO.... | 54 |
| 3.1. Refrigeración de alimentos | 55 |
| 3.2. Refrigeración de vacunas | 62 |
| 3.3. Congelación de alimentos: | 68 |
| CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO | 72 |
| 4.1. Descripción del entorno y necesidades a cubrir..... | 73 |
| 4.2. Descripción dispositivo refrigeración | 74 |
| 4.2.1. Sistema de refrigeración por compresión de vapor | 74 |
| 4.2.1.1. Aislamiento: cálculo del espesor aislante y de la carga térmica..... | 74 |
| 4.2.1.2. Elementos ciclo de refrigeración y refrigerante | 81 |
| 4.2.1.3. Batería térmica | 83 |
| 4.2.2. Dimensionamiento sistema fotovoltaico | 84 |
| 4.3. Costes..... | 86 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN | 89 |
| Referencias | 92 |

Índice de figuras

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 1. Porcentaje de población sin acceso a electricidad</i> | <i>17</i> |
| <i>Figura 2. Niveles históricos de CO₂</i> | <i>18</i> |
| <i>Figura 3. Diagrama Psicrométrico.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 4. Diagrama p-h para sistema frigorífico de compresión de vapor</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 5. Esquema sistema absorción.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 6. Esquema sistema adsorción</i> | <i>30</i> |
| <i>Figura 7. Dibujo efecto termoeléctrico.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 8. Dibujo célula Peltier</i> | <i>32</i> |
| <i>Figura 9. Dibujo técnicas de refrigeración pasiva.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Figura 10. Vasija Pot In Pot</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 11. Cámara de enfriamiento.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 12. Gráfico comparativo entre sistemas solares fotovoltaicos y térmicos</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 13. Máquinas de absorción de simple efecto</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 14. Máquinas de absorción de doble efecto.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 15. Gráfico comparativo de fabricantes de máquinas de absorción</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 16. ISAAC.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 17. Máquinas de adsorción de baja potencia</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 18. Máquinas de adsorción de alta potencia</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 19. Adsorbedor Universidad Nibadan, Nigeria</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 20. Adsorbedor Universidad Mohammed V, Marruecos</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 21. Fresquera alimentada por célula Peltier.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 22. Válvula de expansión.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 23. Válvula solenoide.....</i> | <i>50</i> |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 24. Visor de líquido</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 25. Cámaras frigoríficas de compresión mecánica y distinto tamaño</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 26. Gráfico producción de módulos fotovoltaicos en función del tiempo</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 27. Fresquera Chotukool</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 28. SOLAREF.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 29. ATC</i> | <i>66</i> |
| <i>Figura 30. Gráfica de refrigeradores implantados en África en función del tiempo.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 31. SolarChill</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 32. Circuito de resistencias térmicas.....</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 33. Diagrama psicrométrico pintado.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 34. Cámara frigorífica caso de estudio.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura 35. Compresor caso de estudio</i> | <i>82</i> |
| <i>Figura 36. Mapa zonas climáticas España.....</i> | <i>85</i> |

Índice de tablas

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 1. Características de conservación de alimentos</i> | <i>12</i> |
| <i>Tabla 2. Características de conservación de vacunas</i> | <i>13</i> |
| <i>Tabla 3. Características de congelación de alimentos</i> | <i>14</i> |
| <i>Tabla 4. Relación humedad y temperaturas sistema Pot In Pot</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabla 5. Durabilidad alimentos en sistema Pot In Pot</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 6. Resistencias térmicas superficiales de cerramientos(contacto con exterior) ..</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 7. Número de renovaciones en función del volumen</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 8. Irradiación media global anual según zonas climáticas</i> | <i>81</i> |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Se trata de la presentación del trabajo. En primer lugar, se introduce al ámbito de la refrigeración y a las correspondientes aplicaciones que se van a tener en cuenta en este trabajo. También, se acota el ámbito de operación del trabajo definiendo el concepto de zona aislada y sus características principales.

Además, se presenta la problemática existente de la distribución energética a nivel mundial, centrándose en el desabastecimiento de las zonas rurales y sobretodo, en países subdesarrollados. Por último, se analizan los efectos medioambientales presentes como consecuencia del aumento de la demanda energética a nivel mundial y con ello de los efectos contaminantes que supone.

1.1. Introducción a la refrigeración

Entendemos como refrigeración al cualquier proceso que consiga mantener o bajar la temperatura de un sistema. Esto es posible conseguirlo mediante un correcto aislamiento del sistema (minimización de pérdidas térmicas), mediante la extracción de calor (comúnmente conseguida a través del aprovechamiento del calor latente de una sustancia en cambio de fase) o mediante la generación de un par termoeléctrico que genere una diferencia de temperaturas. Conforme la industria de la refrigeración ha ido evolucionando, se han desarrollado métodos más eficientes para la extracción de calor mediante el uso de refrigerantes (fluidos caloportadores) que abarcan la inmensa mayoría del mercado de refrigeración.

Las aplicaciones más destacables dentro de la refrigeración son la conservación de productos, la climatización de espacios habitados y el mantenimiento de procesos industriales, máquinas (comúnmente motores de combustión interna) o aparatos electrónicos, que requieren de refrigeración debido a las altas temperaturas a las que se ven sometidos.

En este trabajo, se tiene en cuenta solo la refrigeración para conservación de productos (alimentos, medicamentos y vacunas), excluyendo así climatización y refrigeración de grandes procesos industriales y máquinas. Las principales diferencias que existen entre estas aplicaciones residen, fundamentalmente, en el diferente rango de temperaturas que abarcan. Así, podemos definir tres rangos:

- *De 0-12°C*: refrigeración para preservación de alimentos con el fin de ralentizar su deterioro debido a la actividad de agentes patógenos y bacterias. La conservación a temperaturas bajas es la manera más eficaz de aumentar la durabilidad y de minimizar la pérdida de calidad del alimento mediante la reducción de los procesos metabólicos tales como la respiración y la transpiración en el caso de los vegetales. Es importante tener en consideración las diferentes temperaturas a las cuales se conservan cada tipo de alimento. Esto es especialmente importante para frutas tropicales y vegetales ya que sus temperaturas de conservación óptima varían considerablemente. La *Tabla 1* muestra una gran cantidad de alimentos y sus características de conservación.

| Product | Optimum Temperature [°C] | RH [%] | Storage Life |
|----------------------------|--------------------------|--------|--------------|
| <i>Fresh products</i> | | | |
| Apple | -1 to 4.5 | 90-95 | 1-12 months |
| Asparagus | 2 | 95-100 | 2-3 weeks |
| Avocado | 3-13 | 85-90 | 2-8 weeks |
| Banana | 13-15 | 90-95 | 1-4 weeks |
| Blueberries | 0.5-1 | 90-95 | 2-3 weeks |
| Broccoli | 0 | 95-100 | 2 weeks |
| Cabbage | 0 | 95 | 2-3 month |
| Cucumber | 7-10 | 95 | 2 weeks |
| Eggplant | 8-12 | 90-95 | 1 weeks |
| Ginger | 13 | 65 | 25 weeks |
| Guava | 5-10 | 90 | 2-3 weeks |
| Green beans and field peas | 3-7 | 95 | 5-10 days |
| Leafy vegetables | 0 | 95 | 1-2 weeks |
| Lime | 9-10 | 85-90 | 6-8 weeks |
| Mango | 13 | 90-95 | 2-3 week |
| Onion | 0 | 70 | 2-3 month |
| Papaya | 7-13 | 85-90 | 1-3 weeks |
| Passionfruit | 7-10 | 85-90 | 3-5 weeks |
| Peach | 0 | 95-98 | 2-4 weeks |
| Peppers | 7-10 | 90-95 | 2-3 weeks |
| Potato | 3-4.5 | 90-95 | 5-8 month |
| Strawberry | 0 | 90-95 | 5-7 days |
| Sweet corn | 0 | 90-95 | 5-7 days |
| Sweet potato | 13 | 90 | 6-12 months |
| Tomato, pink | 9-10 | 85-95 | 7-14 days |
| Turnip | 0 | 95 | 4-5 months |
| Watermelon | 10-15.5 | 90 | 2-3 weeks |
| Fish | 0-3 | 90 | 1-3 days |
| Meat | 0-3 | 90 | 2-7 days |
| Milk | 4 | - | 3-5 days |
| <i>Cooked food</i> | | | |
| Vegetables | 0-4 | - | 2-4 days |
| Fish | 0-4 | - | 2-3 days |
| Meat | 0-4 | - | 3-5 days |
| Soup | 0-4 | - | 2-3 days |

Tabla 1[Apuntes Sistemas Térmicos UC3M, 2016]

- De 2-8°C: refrigeración de vacunas. Es un intervalo de temperaturas algo más restrictivo. Es importante tanto evitar la congelación como la exposición a la luz (Tabla 2). También, el mantenimiento de la cadena de frío es fundamental por lo que una característica esencial en el sistema de refrigeración que las almacene y preserve, será la autonomía del mismo. En el caso de las vacunas, la pérdida de las propiedades inmunizantes es irreversible y acumulativa [AEP, 2017].

| Cuadro 3. Almacenamiento de la vacunas. | |
|---|---|
| Vacuna | Almacenamiento en el consultorio |
| BCG | 2-8°C / No congelar / Proteger de la luz |
| DPT / dT | 2-8°C / No congelar |
| H. influenzae b conjugada | 2-8°C / No congelar |
| Hepatitis B | 2-8°C / No congelar / Proteger de la luz |
| Sarampión-Rubeola-Paperas | 2-8°C / No congelar / Proteger de la luz |
| Varicela | 2-8°C / No congelar / Proteger de la luz |
| Influenza | 2-8°C / No congelar / Proteger de la luz |
| Polio virus vivos | 2-8°C / No congelar / Descartar después de 8 horas de abierta |
| Polio virus muertos | 2-8°C / No congelar |
| Hepatitis A | 2-8°C / No congelar |
| S. pneumoniae 7v conjugada | 2-8°C / No congelar |
| S. pneumoniae 23v polisacáridos | 2-8°C / No congelar |

Tabla 2 [<http://www.scielo.sa.cr/>. Consultado 12/05/2018]

- *Por debajo de 0°C:* congelación. La mayoría de productos a congelar suelen ser alimentos debido a que a temperaturas muy bajas (en torno a -18°C), el alimento no envejece ya que los patógenos que descompondrían al mismo quedan en un estado de latencia. Esto permite la conservación de prácticamente todas las propiedades y nutrientes del alimento. Esto es verdaderamente útil sobre todo para la conservación de alimentos como el pescado que pueden estar infectados por parásitos que pueden ser eliminados mediante congelación un par de días.

Los sistemas de congelación suelen ser los más potentes debido a que la carga térmica a cubrir es considerablemente mayor que los sistemas de refrigeración por encima de los 0°C, debido a la amplia diferencia de temperaturas. La *Tabla 3* muestra la temperatura de congelación, calor específico y latente y humedad relativa de una gran variedad de alimentos.

| Alimento | Ref | % agua | Temp. Inicio Cong. ° (°C) | Calor Latente fusión (KJ/Kg) | Calor específico (KJ/Kg °C) | |
|----------------------------|-----|--------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | | | Debajo del Punto de Congelación | Encima del Punto de Congelación |
| Atún | [2] | 70 | | | 1.72 | 3.18 |
| Bacalao | [2] | 70 | -2.2 | 277 | 1.72 | 3.18 |
| Tocino fresco | [2] | 57 | | | | 2.01 |
| Carne de cerdo fresca | [2] | 60-75 | -2.0 | 201 | 1.60 | 2.85 |
| Carne de res fresca, grasa | [2] | | -2.2 | 184 | 1.47 | 2.51 |
| Salchicha frankfurt | [2] | 60 | -1.7 | 200 | 2.35 | 3.73 |
| Pollo fresco | [2] | 74 | -2.8 | 247 | 1.55 | 3.31 |
| Aguacate | [2] | 94 | -2.7 | 316 | 2.05 | 3.81 |
| Limón | [2] | 89.3 | -2.2 | 295 | 1.93 | 3.85 |
| Manzana | [2] | 84 | -2.0 | 281 | 1.85 | 3.60 |
| Salsa de Manzana | [3] | 82.8 | -1.67 | | | |
| Mango | [2] | 93 | 0.0 | 312 | 1.93 | 3.77 |
| Naranja | [2] | 87.2 | -2.2 | 288 | 1.93 | 3.77 |
| Pera | [2] | 83.5 | -1.9 | 275 | 1.99 | 3.60 |
| Jugo de pera | [3] | 87.2 | -1.44 | | | |
| Plátano | [2] | 74.8 | -2.2 | 253 | 1.76 | 3.35 |
| Apio | [2] | 93.7 | -1.3 | 314 | 2.01 | 3.98 |
| Lechuga | [2] | 94.0 | -0.4 | 316 | 2.01 | 4.02 |
| Repollo | [2] | 92.4 | -0.5 | 306 | 1.97 | 3.94 |
| Tomate | [2] | 94 | -1.0 | 312 | 2.01 | 3.98 |
| Zanahoria | [2] | 88.2 | -1.3 | 293 | 1.90 | 3.70 |

Tabla 3: [<http://www.conocimientosweb.net/>. Consultado: 12/05/2018]

1.2. Refrigeración en zonas aisladas

Las principales características que se han tenido en cuenta en este trabajo para delimitar el concepto de zona aislada están basadas en el libro “Tecnologías para el desarrollo humano de las comunidades rurales aisladas” [RAI, 2011]. Algunas de ellas son:

- Aislamiento geográfico: zonas aisladas completamente de cualquier núcleo de población o con difícil acceso a grandes núcleos de población donde es más fácil encontrar recursos energéticos. En su mayoría, entornos rurales. Por lo que se descarta el uso de combustibles fósiles, entre otras fuentes energéticas, debido a su alto grado de dependencia del abastecimiento del mismo.
- Carencia de infraestructuras: disponibilidad muy limitada o nula de infraestructuras suficientes para la provisión de servicios tales como suministro de agua, saneamiento, red eléctrica y telecomunicaciones. Por lo tanto se enfoca la implantación de tecnologías que permitan el autoabastecimiento.

- Exclusión de la provisión de servicios por los organismos responsables de ello: administraciones estatales que no cumplen con sus responsabilidades a nivel de suministro de servicios básicos esenciales. Esto está muchas veces relacionado por el alto coste que supone el suministro debido a las grandes distancias entre los centros de producción y las zonas aisladas. Además, en los casos de poblaciones con escasos ingresos, se une la falta de apoyo por parte de gobiernos para salvar la brecha entre los pocos ingresos y los altos costes de suministro.
- Entornos naturales: estos entornos se encuentran ubicados comúnmente en espacios naturales por lo que a la hora de implementar tecnologías e infraestructuras se requieren diseños adecuados que respeten, se integren e incluso que se inspiren en el medio natural en el que actúan. Además, una de las fuentes de energía térmica más común, sobre todo para uso doméstico, es la leña, la cual conlleva a la deforestación del medio. Otra razón más para apostar por la implantación de tecnologías que permitan la calefacción y refrigeración siendo más respetuosas con el medio ambiente.

Asimismo, se da por hecho que se está operando en un nivel económico medio-bajo, eximiendo así a personas con elevados ingresos u organizaciones con gran capital económico que puedan obtener los fines deseados de manera simple y “cueste lo que cueste”. También, en este trabajo se tiene en cuenta como “entorno aislado” a los sistemas de refrigeración portátiles que cubren las necesidades de refrigeración de pequeños volúmenes.

Algunas de las características más importantes a la hora de pensar en las demandas que exige la refrigeración son:

- Continuo suministro de energía calorífica: se requiere un suministro continuo de energía para mantener las temperaturas deseadas de refrigeración. En algunos casos, como en la refrigeración de vacunas o la congelación de alimentos, una interrupción de la cadena del frío puede suponer la pérdida de las mismas.

- Diseño complejo: los sistemas de refrigeración suelen ser sistemas complejos que requieren de personal cualificado para su construcción o reparación en caso de avería.
- Alto coste: los sistemas de refrigeración conllevan generalmente costes relativamente altos tanto por las demandas energéticas que suponen como por los precios de adquisición de los mismos.

El objetivo de este trabajo es encontrar el diseño más apropiado para satisfacer al máximo las necesidades de refrigeración a pesar de las limitaciones que conlleva el entorno y las propias tecnologías de refrigeración.

1.3. Problema energético

La energía es uno de los principales recursos naturales primarios asociados a la producción de bienes y servicios con el fin de satisfacer las necesidades y actividades humanas. Dentro de todos los usos que se le puede dar, la energía térmica representa el 47% del total de energía usado en los países de la OECD (mayor que el porcentaje usado en electricidad, 17%, y transporte, 27%) [Abdul Ghafoor et al, 2015].

Además, desde mediados del siglo XXI y debido a múltiples factores tanto sociales como económicos (aumento de la población mundial, aumento de las relaciones mercantiles debido a la globalización, etc.) la demanda mundial de energía para satisfacer las necesidades y el desarrollo humano ha aumentado y sigue aumentando de manera vertiginosa. La unión europea estima un incremento de la demanda energética del 70% en 2030 (el cual era un 50% en el año 2000) y prestando mucha atención al considerable aumento de las demandas de climatización y refrigeración debido a los efectos adversos que conlleva el calentamiento global [Ioan Sarbu et al, 2013].

Por otra parte, la IEA (International Energy Agency) estimó en 2010 que 1,3 billones de personas, más de un quinto de la población mundial, no tiene acceso a energía eléctrica. El 85% de estas personas vive en áreas rurales, mayormente en África subsahariana y en el sur de Asia, donde no hay redes de distribución de energía

eléctrica ni perspectivas a corto plazo de que las haya. Incluso en zonas con suministro de energía por red, el aumento de la demanda eléctrica ha superado por completo el aumento del suministro resultando en zonas con insuficiente electricidad para mantener dispositivos que requieren de un suministro de electricidad continuo [Steve McCarney et al, 2013]. En la *Figura 1* se puede apreciar un gráfico con los porcentajes de población sin acceso a electricidad para África, América Latina, los países en desarrollo asiáticos y Oriente Medio.

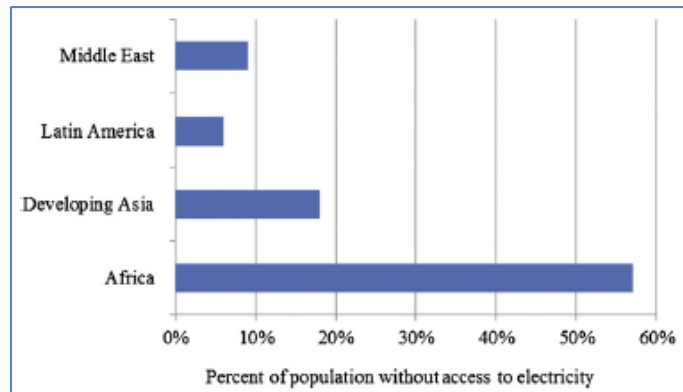


Figura 1[Steve McCarney et al, 2013]

1.4. Efectos medioambientales

El aumento de la demanda energética a nivel mundial tiene consecuencias medioambientales directas e indirectas muy perjudiciales y graves para la salud de nuestro entorno natural. Por otra parte, la introducción de tecnologías en entornos aislados (que comúnmente carecen de ellos) supone la introducción de un nuevo agente contaminante, tanto por los residuos que conlleva como por las emisiones que pueda generar. Podemos encontrar efectos perjudiciales para el medio ambiente a distintas escalas: a nivel mundial, regional y local:

- **Nivel global:** desde la revolución industrial (aproximadamente 1850), la principal fuente de recursos energéticos han sido los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural y gas licuado del petróleo). De hecho, la Agencia Internacional de Energía reveló en un informe de 2010 que de los 19738 TWh consumidos durante ese mismo año, un 68% provenían exclusivamente de combustibles fósiles [International Energy Agency, 2010].

Una de las grandes problemáticas de los combustibles fósiles es la emisión de gases tóxicos que genera su uso propiciando el efecto invernadero y con ello el calentamiento de la superficie terrestre. Esto tiene grandes consecuencias como el retroceso y deshielo de los glaciares, el aumento del nivel del mar, la alteración de los ciclos de precipitaciones y el aumento de zonas desérticas. Además del aumento de gases nocivos para la salud en las grandes ciudades.

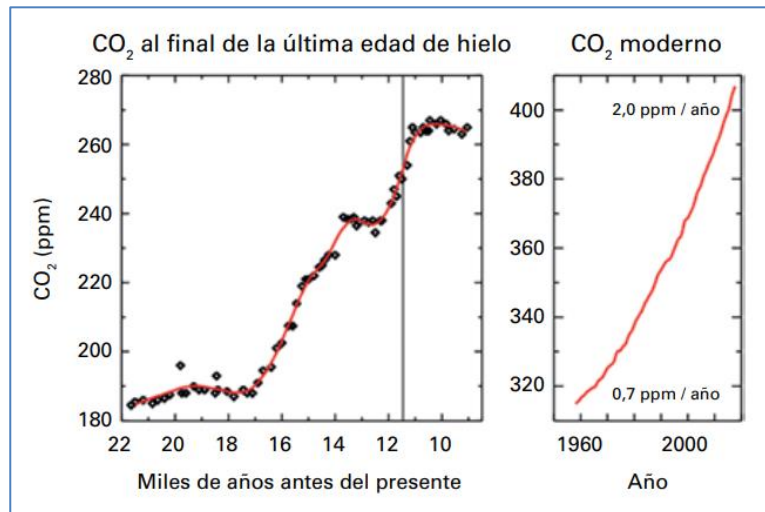


Figura 2 [Organización Meteorológica Mundial, 2017]

Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial) desde el comienzo de la industrialización el contenido atmosférico de dióxido de carbono (CO₂) ha pasado de unas 278 ppm a una media global de 403,3 ppm (registradas en 2016). Es decir hemos alcanzado el 145% del nivel preindustrial. La Figura 2 ilustra los niveles de CO₂ en partes por millón para el final de la última edad de hielo y para los últimos 70 años. La fina área gris de la gráfica de la izquierda (que parece una línea vertical) corresponde a un período de 70 años similar al de la gráfica de la derecha. Todos estos datos han sido extraídos de mediciones directas en los núcleos de hielo antárticos mediante la extracción de pequeñas burbujas de aire de los mismos [Organización Meteorológica Mundial, 2017].

A nivel global, los sistemas de refrigeración convencionales tienen un gran potencial de efecto invernadero debido al uso de refrigerantes del grupo de los clorofluorocarbonos (CFC's y HCFC's). Estos compuestos tienen un gran papel en la destrucción de la capa de ozono que conlleva a una peor filtración de la

radiación, dejando pasar gran parte de radiación ultravioleta perjudicial para los seres vivos a la superficie terrestre contribuyendo así al calentamiento global. Para solventar este gran problema se han llevado a cabo numerosas convenciones tales como la “Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono” (1985), el “Protocolo de Montreal” (1987) o el “Protocolo de Kyoto sobre el Calentamiento Global” (1998) .Tras la prohibición de los CFC’s con el Protocolo de Montreal, otra de las metas era prohibir todos los HCFC’s (sustancias sustitutivas de los CFC’s debido a su menor toxicidad y persistencia en el medio ambiente, aun así son sustancias destructoras de la capa de ozono) para 2015. Actualmente y según la última instancia del parlamento europeo sobre los gases fluorados de efecto invernadero, se ha establecido un calendario de reducción y de paulatina prohibición de los actuales gases refrigerantes [A. Allouhi et al, 2015].

- **Nivel regional:** se considera contaminación a nivel regional a la contaminación urbana o industrial que recorre grandes distancias y que puede llegar a repercutir en el medio rural. Un ejemplo es la lluvia ácida (se pueden observar a decenas de kilómetros del punto de origen) originada, entre otros compuestos, por compuestos fluorocarbonados y que conlleva la acidificación de la biosfera (suelos, ríos...). Además, la mala gestión del uso de los refrigerantes y su posible vertido irresponsable sobre ríos puede conllevar una contaminación considerable de los mismos y de las zonas circundantes. También, la mala gestión de baterías electrónicas de algunos sistemas que requieren de almacenaje de energía eléctrica, puede conllevar efectos contaminantes en ríos y suelos una vez se liberan los componentes tóxicos de la carcasa en la que estaban confinados (cadmio, zinc, plomo, mercurio, arsénico y cromo).
- **Nivel local:** esta contaminación está causada por fuentes fijas o móviles y suele estar asociada a contaminantes con un tiempo de permanencia pequeño en la atmósfera y a menudo imperceptibles para los sentidos de los seres vivos. A esta escala podemos asociar el residuo que supone la máquina frigorífica una vez alcanzado su tiempo de vida útil. Existen algunos componentes que se pueden reciclar según el tipo de refrigerador que estemos usando. En el caso de refrigeradores convencionales con compresor, el

compresor contiene en su interior un bobinado de hilo de cobre que puede reciclarse. Además, el contenedor frigorífico siempre puede ser usado como espacio de almacenaje o como futuro contenedor frigorífico si se repone el compresor.

Por otra parte, las baterías electrónicas son altamente contaminantes y tóxicas para los seres vivos. También, un mal uso del refrigerante puede conllevar consecuencias perjudiciales para el entorno cercano. Un ejemplo es la propia toxicidad del amoníaco (refrigerante de algunos sistemas de absorción).

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo se centra en la descripción y análisis de los ciclos termodinámicos de producción de frío así como en las principales tecnologías óptimas para implementarlos de la manera más conveniente. Dentro de las tecnologías, la primera división presente será entre sistemas activos y pasivos. La diferencia fundamental entre ambos es el medio para canalizar la fuente de energía; siempre que sea el propio medio que rodea al sistema, será pasivo, mientras que si necesitamos de una tecnología auxiliar para la captación de la energía, lo consideraremos activo. A pesar de que otras fuentes académicas consideren a los sistemas fotovoltaicos sistemas pasivos, en este trabajo se les tiene en cuenta como sistemas activos debido a que requieren de módulos fotovoltaicos para la obtención de energía eléctrica.

Además, las principales tecnologías de las que se hará el estudio no son las únicas en el terreno de la refrigeración y las que no han sido incluidas no están relacionadas con los siguientes capítulos ya que no tienen cabida con las líneas generales que acotan el trabajo.

Algunos ejemplos serían las tecnologías que operan con ciclos Rankine y Stirling de generación de potencia. Ambos ciclos pueden ser usados para la generación de potencia para la alimentación de compresores de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Por ejemplo, una de las aplicaciones actuales del ciclo Stirling, está centrada en la industria criogénica ya que el ciclo resulta ser más eficiente a temperaturas muy bajas.

Se ha descartado también el uso de combustibles fósiles como posible opción para alimentar máquinas que requieran de trabajo o calor, debido al difícil acceso a los mismos en zonas aisladas y a la dependencia que suponen para el continuo abastecimiento de la tecnología que se esté usando.

2.1. Principales ciclos y mecanismos de refrigeración

Este apartado pretende dar una visión general de los principales mecanismos de refrigeración que conocemos hoy en día y con los que trabajaremos más adelante en este trabajo.

2.1.1. Evaporación

El enfriamiento por evaporación es el proceso mediante el cual la temperatura de una sustancia se ve reducida debido al efecto enfriador que supone la evaporación de agua. La conversión de calor sensible (calor relacionado con los cambios de temperatura) a calor latente (calor relacionado con los cambios de estado) causa una disminución en la temperatura ambiente a medida que el agua se evapora. El ejemplo más claro de enfriamiento por evaporación se da en los humanos después de una alta actividad física que conlleva la secreción de sudor. Es notable la bajada de la temperatura corporal que conlleva la evaporación de sudor. La información de este apartado proviene mayormente de [J.T. Liberty et al, 2014] y apuntes de la asignatura Sistemas Térmicos.

A nivel microscópico, el fenómeno de evaporación ocurre cuando las moléculas superficiales de agua toman energía de su entorno (incremento de energía cinética), concretamente el calor latente de vaporización, venciendo las interacciones con sus moléculas más próximas y escapando a fase vapor. Es un fenómeno que, a diferencia de la ebullición, sucede a presión y temperatura ambiente y no requiere de ninguna fuente externa de energía.

A nivel macroscópico, el enfriamiento evaporativo ocurre cuando el aire, que no se encuentra muy húmedo, pasa sobre una superficie mojada absorbiendo la humedad de la misma. La eficiencia del proceso depende de la cantidad de humedad que haya en el aire ambiente. Cuanto más seco sea el aire, más cantidad de humedad será capaz de absorber. En el caso de que el aire ambiente se encuentre completamente saturado, no se llevará a cabo la evaporación y por lo tanto no habrá efecto enfriador. Por otra parte, aunque el aire sea muy seco, llegará un momento en el que no pueda admitir más vapor de agua y dejará de darse el efecto enfriador. Aun así, el efecto

sigue siendo considerablemente mayor cuanto más porcentaje de aire seco haya en el ambiente. Además, cuanto más rápido sea el proceso de evaporación, mejor el efecto enfriador.

Para obtener todas las variables implicadas en el proceso de humidificación del aire, se recurre al diagrama psicrométrico. En él se reflejan las temperaturas de bulbo seco y húmedo y la temperatura de rocío, así como la humedad relativa, el volumen específico y la entalpía. En la *Figura 3* se muestra un diagrama psicrométrico.

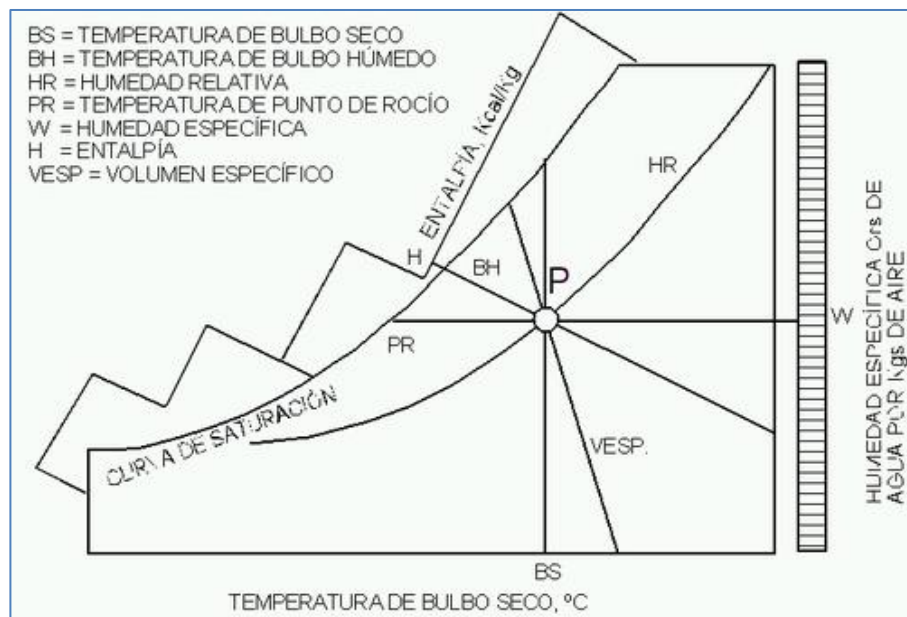


Figura 3 [<https://es.wikipedia.org>. Consultado: 16/04/18]

La temperatura mínima teórica que se puede alcanzar mediante este proceso viene dada por la temperatura de bulbo húmedo que es la temperatura en el cual el aire está completamente saturado de agua y que es medida mediante un termómetro rodeado por una muselina humedecida por agua. La temperatura de bulbo seco es la temperatura medida con un termómetro convencional. La diferencia entre las temperaturas de bulbo húmedo y bulbo seco caracteriza el potencial evaporativo del sistema. Cuanto mayor sea la diferencia, mejor efecto evaporativo ya que menor humedad específica. Si ambas temperaturas son iguales, no hay efecto evaporativo.

Por lo tanto las condiciones óptimas para que el proceso de enfriamiento evaporativo sea satisfactorio son:

- Altas temperaturas en el ambiente: mayor energía disponible para que el agua pueda pasar a fase vapor.
- Baja humedad del ambiente: cuanto más seco sea el aire, mayor cantidad de vapor de agua será capaz de admitir, aumentando el efecto refrigerador.
- Acceso a agua: la calidad del agua es importante ya que si se haya contaminada, al evaporarse podría dejar sustancias no deseadas dentro del sistema pudiendo afectar al mantenimiento del mismo.
- Aire en movimiento: que el aire este en movimiento facilita el remplazamiento del aire húmedo y saturado por aire seco prolongando así el efecto refrigerante de la evaporación.
- Superficie recipiente evaporativo: cuanto mayor sea la superficie donde se dé la evaporación, mayor tasa evaporativa.

2.1.2. Fusión

Del mismo modo que el fenómeno de evaporación produce un efecto de enfriamiento del ambiente debido al aprovechamiento del calor latente en el cambio de fase líquido-vapor, la fusión también es un proceso endotérmico (absorbe energía) de cambio de fase y por lo tanto, un mecanismo de refrigeración.

A nivel microscópico, la fusión comparte el mismo proceso molecular que la evaporación, es decir, un aumento de la energía cinética de las moléculas propiciado por el calor suministrado y que supone un vencimiento de las fuerzas de cohesión entre las mismas pasando de fase sólida a líquida. A nivel macroscópico, al absorber calor, el hielo se derrite y se va formando una mezcla de hielo y agua en condiciones saturadas. La temperatura se mantiene constante (0°C) al ser un cambio de fase. La capacidad de enfriamiento del hielo es equivalente al calor latente del mismo al pasar de estado sólido a líquido que es 333MJ/m³.

Algunas características a tener en cuenta de este método son:

- A medida que el hielo se derrite, hay menos superficie del bloque que se puede utilizar. Esto supone una absorción de calor más lenta.
- Se requiere un suministro continuo de hielo.
- La temperatura deseada no es variable sino la que provee el hielo (0°C).

2.1.3. Ciclo de compresión de vapor

El objetivo del ciclo de compresión de vapor es la extracción de calor de un foco a baja temperatura (zona que queremos refrigerar) para transferirlo a otro de mayor temperatura (comúnmente el ambiente). Mediante el aporte de trabajo, se logra que el fluido refrigerante se mueva entre los dos focos a distintas temperaturas y a distintas presiones, absorbiendo y descargando grandes cantidades de calor. Este ciclo se lleva a cabo mediante una serie de procesos termodinámicos aplicados a un refrigerante. En la *Figura 4* se aprecia un diagrama P-h (presión-entalpía) genérico.

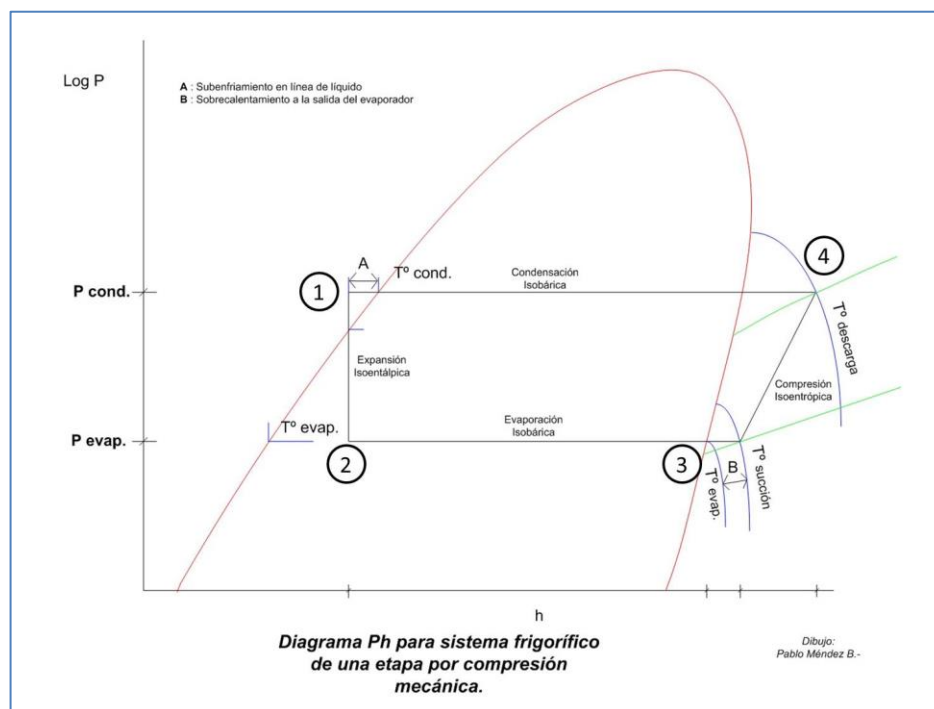


Figura 4 [<https://es.wikipedia.org>. Consultado: 2/05/18]

El refrigerante trabaja a dos presiones distintas, presión del condensador (presión de alta del circuito) y presión del evaporador (presión de baja del circuito). En el punto 1, el refrigerante sale del condensador en estado de líquido saturado y fluye a través de una válvula de expansión disminuyendo su presión a la presión del evaporador (presión del lado de baja) y su temperatura, sin intercambiar calor ya que se considera un proceso isoentálpico. En el punto 2, el refrigerante entra en el evaporador en estado líquido donde se evapora aprovechando el calor latente (reacción endotérmica) y generando el efecto refrigerador sobre el foco frío. Del evaporador el refrigerante sale en estado vapor en el punto 3 y entra en el compresor donde eleva su presión hasta la presión del condensador (presión del lado de alta) y su temperatura. Este proceso es considerado isentrópico, es decir, a entropía constante (no hay transferencia de calor). En el punto 4, el refrigerante en fase vapor entra en el condensador cediendo calor al foco caliente y pasando a fase líquida.

Cabe destacar los segmentos A y B del gráfico que se corresponden con el subenfriamiento y recalentamiento, respectivamente, que se lleva a cabo en un intercambiador de calor:

- Subenfriamiento: corresponde con el segmento A que indica el diagrama a la salida del condensador (1) y está pensado para aumentar el efecto frigorífico del sistema ya que aumenta la diferencia de entalpías entre los puntos 2 y 3.
- Recalentamiento: corresponde con el segmento B que indica el diagrama a la salida del evaporador (3) y es una acción que previene de la entrada de líquido al compresor que puede ser muy destructivo. Además se aumenta el efecto frigorífico del sistema al aumentar la diferencia de entalpías entre los puntos 2 y 3.

Comúnmente, el recalentamiento y subenfriamiento se dan en un intercambiador de calor interno donde se conectan la salida del condensador y del evaporador.

Cabe destacar también, que el compresor puede ser sustituido por un generador y un absorbedor, como se detalla más adelante en los procesos de absorción y adsorción (*Apartado 2.1.4.*).

Otra consideración importante radica en las diferencias entre el ciclo de compresión de vapor ideal/teórico y la ejecución real del ciclo. Se detalla más adelante en el *Apartado 2.2.2.3*.

2.1.4. Absorción y adsorción

Los ciclos de absorción y adsorción se rigen por el mismo principio que los ciclos de compresión, es decir, el uso de una sustancia caloportadora que transporte la energía térmica. La naturaleza de estos ciclos es la misma que la de los ciclos de compresión, es decir, la compresión de un refrigerante en fase vapor desde un foco frío para su cesión de calor en un foco caliente, donde libera el calor y su posterior expansión. La diferencia fundamental recae en la etapa de compresión que en lugar de llevarse a cabo mediante un compresor mecánico al que suministramos trabajo, se realiza mediante un compresor térmico, es decir, un compresor que eleva la presión mediante el uso de una fuente de calor externa.

La fuente de energía que alimenta estos sistemas puede tener diversos orígenes: combustión en caldera, energía solar, calores residuales, geotermia, etc.

La información de estos apartados esta obtenida mayormente de [Michael J.Moran, 2004].

- **Refrigeración por absorción:**

Los sistemas de refrigeración por absorción utilizan la energía calorífica calor para separar el refrigerante del líquido absorbente y así poder realizar el ciclo de absorción. El refrigerante es absorbido por una sustancia secundaria (absorbente) en el absorbedor, formando así una solución líquida que se comprime a alta presión. Dado que el volumen específico medio de la solución líquida es mucho menor que el del vapor del refrigerante, el trabajo necesario para aumentar su presión es mucho menor y suele emplearse una bomba para ello.

Es en el generador donde se separa la mezcla de refrigerante y absorbente consiguiendo así el refrigerante en fase vapor. Este necesita de una fuente de calor externa relativamente alta para conseguir volatilizar el refrigerante. El resto del sistema sigue la lógica de un sistema de compresión de vapor, es decir, el refrigerante pasa

por un condensador donde libera el calor, una válvula de expansión que produce una caída de presión y un evaporador donde produce el efecto refrigerante.

En la *Figura 5* se muestra el esquema de un sistema de absorción.

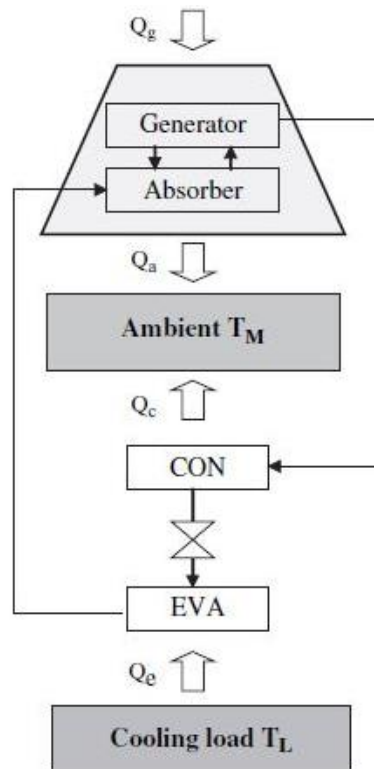


Figura 5 [Kim et al, 2008]

Donde:

- Q_c : calor cedido por el condensador (kW).
- Q_e : calor absorbido por el evaporador (kW).
- Q_g : calor absorbido por el generador (kW).
- Q_a : calor cedido por el absorbedor (kW).
- T_L : temperatura zona a enfriar
- T_M : temperatura ambiente

El coeficiente de operación del sistema de refrigeración (COP) viene dado por:

$$\text{COP}_{\text{ref}} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (2.1)$$

Los dos principales sistemas de absorción funcionan con los pares de fluidos:

- *Amoniaco – Agua*: el refrigerante es el amoniaco y el absorbente agua. La principal ventaja de estos sistemas es la baja temperatura a la que pueden llegar, por lo que son usados cuando interesa alcanzar temperaturas bajo cero. Además es una solución que no tiene riesgo de cristalización. Por otra parte, el NH_3 es tóxico y peligroso para la salud y las máquinas de absorción solares requieren de altas temperaturas (125-170°C) en el generador por lo que se necesita colectores parabólicos o de vacío.
- *Bromuro de Litio – Agua*: en este caso el refrigerante es el agua y el absorbente el bromuro de litio. Estas sustancias no son tóxicas y el bromuro de litio no es volátil por lo que no hay problemas de rectificación o destilación del refrigerante para la limpieza del residuo de absorbente tras el paso a fase vapor del refrigerante. Requieren de temperaturas de entre 70-90°C en el generador y no pueden operar a temperaturas menores que 0°C ya que se produciría la congelación del refrigerante (agua), por lo que su uso es preferible para climatización de espacios. Por otra parte, requieren de torres de refrigeración lo que hace que aumente el tamaño del mismo debido a los grandes volúmenes de vapor con los que opera. Estos sistemas funcionan a bajas presiones por lo que requieren de alta estanqueidad. Además, el bromuro de litio es corrosivo y la máquina requiere de aditivos anticorrosivos.

- **Refrigeración por adsorción**

Los sistemas de refrigeración por adsorción utilizan la energía calorífica para separar el refrigerante del medio adsorbente el cual es un sólido poroso. Es decir, la principal diferencia con los sistemas de absorción es la naturaleza del absorbente-adsorbente (fluido en absorción, sólido poroso en adsorción). Se pueden dar dos tipos de adsorciones:

- *Adsorción física*: las moléculas de refrigerante se agrupan en la superficie del adsorbente mediante fuerzas de Van Der Waals. Algunos ejemplos de pares de

elementos son el carbón activo con amoníaco, carbón activo con metanol o el gel de sílice y agua.

- *Adsorción química:* corresponde a la compartición de electrones entre el gas y el sólido resultando en la participación de mayores niveles de energía (3). Algunos ejemplos de pares son las sales de amoníaco con compuestos alcalinos o los hidruros de metal e hidrógeno con baja histéresis intermetálica.

En ambos casos, los pares para el sistema de adsorción son los componentes críticos y la mayoría del trabajo reciente para el desarrollo de máquinas de adsorción se centra en la elección óptima de un par de compuestos.

La *Figura 6* muestra el esquema de un sistema de adsorción. Consiste en un sólido adsorbente dividido en dos zonas (1 y 2), un evaporador y un condensador. El calor suministrado al adsorbente hace que el medio adsorbente expulse el refrigerante (1). Este fluye al condensador donde pasa a fase líquida hasta alcanzar su máxima temperatura y llega al evaporador. El refrigerante pasa a fase vapor proporcionando el efecto enfriador requerido en el evaporador y el adsorbente (2) lo adsorbe cerrándose el ciclo.

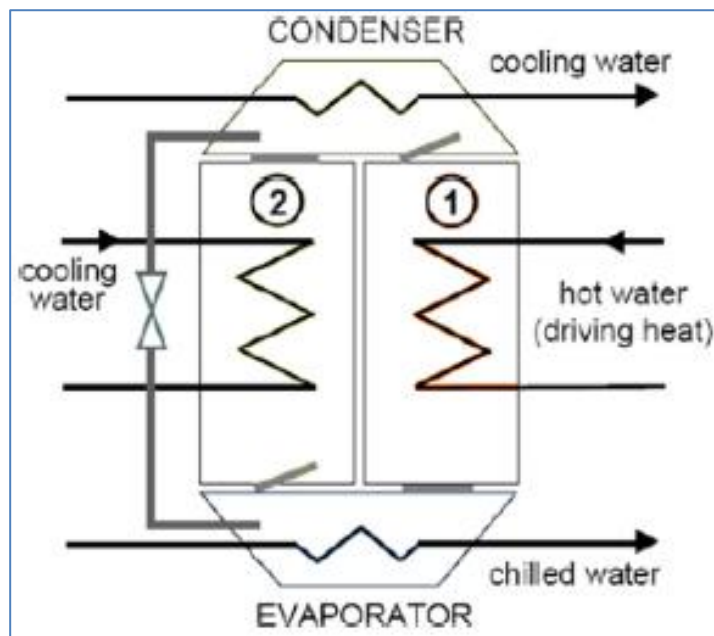


Figura 6 [Abdul Ghafoor et al, 2015]

2.1.5. Termoelectricidad

Los sistemas termoelectricos están basados en el efecto Peltier. Dicho efecto se basa en el principio del efecto Seebeck que explica cómo dos conductores a distintas temperaturas generan una corriente eléctrica. Por lo tanto, inversamente, una corriente eléctrica generara una diferencia de temperaturas entre dos focos, uno frío y uno caliente (*Figura 7*).

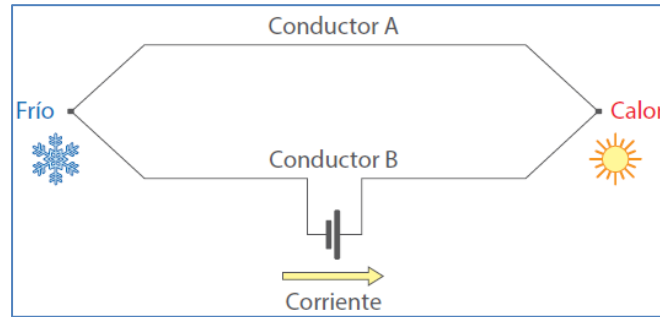


Figura 7[BLINDER, 2015]

Esto se debe a que los electrones se “comportan” como un gas ideal, es decir, cuando fluyen de una zona con alta densidad de electrones a otra de baja densidad se expanden enfriando la zona.

El coeficiente Peltier Π puede expresarse como:

$$\Pi = Q \cdot T \quad (2.2)$$

Donde Q es la llamada termopotencia (V/K) de cada conductor metálico y T su temperatura (K).

La cantidad de calor liberada (W) en la unión de dos conductores por el efecto Peltier es:

$$W = (\Pi_A - \Pi_B) \cdot I \quad (2.3)$$

Donde la diferencia de coeficientes Π es la diferencia entre las distintas termopotencias de ambos conductores. Podemos apreciar que el flujo térmico es proporcional a la corriente eléctrica. El signo del flujo térmico depende de la dirección

de la corriente, indicando absorción de calor si es negativo y cesión de calor si es positivo.

Al ser la corriente el “refrigerante” del sistema, hemos de tener en cuenta también las pérdidas caloríficas ocasionadas por efecto Joule y que en la práctica, con el aumento de la corriente, aumenta la pérdida eléctrica más rápidamente que la transferencia de calor. Luego la potencia de refrigeración aumenta a partir de una intensidad de corriente determinada. Por ello, a pesar de que parezca intuitivo que al multiplicar la capacidad de bombeo de calor aumentará la eficiencia del efecto Peltier, supone una pérdida de potencia.

Debido a que el factor de termopotencia Q se diferencia solo por algunos $\mu\text{V/K}$ en los materiales conductores, se ha recurrido a la utilización de algunos semiconductores cuya tensión termoeléctrica es mucho mayor y que logran maximizar el efecto tales como el Bi_2Te_3 y el Sb_2Te_3 . Esto se debe a que en los materiales semiconductores suelen estar dopados con una cantidad de huecos o exceso de electrones que permite con más facilidad la migración de electrones al lado frío estableciendo así la diferencia de potencial deseada. Además de conducir bien la electricidad, son buenos aislantes térmicos.

Llamamos termoelemento al conjunto de termopares conectados en serie que componen el elemento Peltier (*Figura 8*). Estos termopares consisten en la unión de los dos semiconductores de dopaje tipo N y P mediante unas placas generalmente de cobre. Los electrones fluyen del tipo N al tipo P estableciendo así una diferencia de potencial y removiendo el calor de un lado del dispositivo.

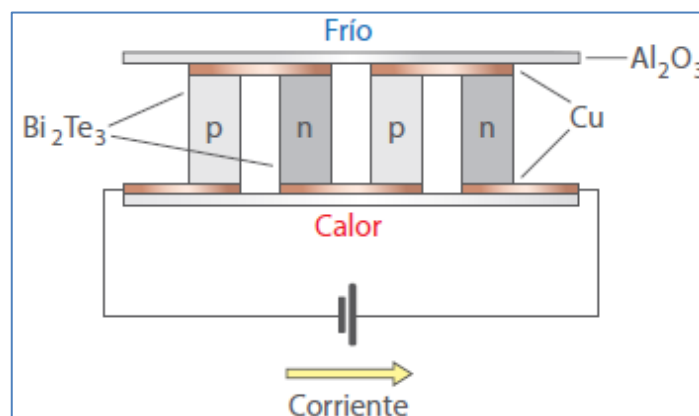


Figura 8 [BLINDER, 2015]

Los módulos Peltier han experimentado una bajada en los precios de coste y fabricación debido a los recientes progresos en el campo termoeléctrico.

La información y figuras de este apartado está basada en su mayoría en [BLINDER, 2015].

2.2. Principales tecnologías de refrigeración

Una vez desglosados los principales mecanismos de refrigeración y sus procesos físicos, químicos y termodinámicos, queda plantear su implantación real. Este apartado pretende dar una visión general de las principales tecnologías con las que se va a trabajar.

A pesar de la distinción entre refrigeración pasiva y activa, cabe destacar que cualquier tecnología de refrigeración tiene dos partes fundamentales a tener en cuenta:

- Aislamiento: mantenimiento de la temperatura interior de la zona a refrigerar mediante el correcto aislamiento evitando así el intercambio de calor con el exterior.
- Generación de frío: mantenimiento de la temperatura interior de la zona a refrigerar mediante procesos de refrigeración.

2.2.1. Refrigeración pasiva

Llamamos refrigeración pasiva al conjunto de técnicas y procesos por los que un determinado sistema consigue mantener la energía calorífica en su interior constante y, en algunos casos, enfriarse de manera natural, es decir, sin hacer uso de una tecnología auxiliar que aporte energía. La refrigeración pasiva es útil cuando operamos en rangos de temperaturas entre 10-25°C.

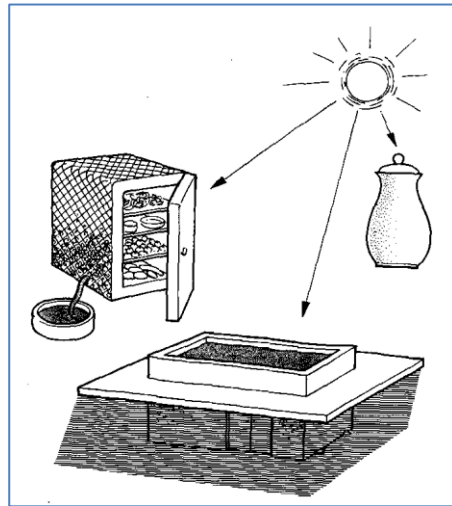


Figura 9[Appropedia]

Estas técnicas pueden dividirse en dos categorías:

- *Técnicas preventivas*: “protegen” y previenen el aumento de la temperatura en el interior del sistema. Es a lo que nos referimos como aislamiento del sistema. Algunos factores importantes a tener en cuenta para el buen aislamiento de nuestro sistema son el diseño según la zona climática donde se vaya a ubicar, el control de la radiación solar recibida y el aislamiento del sistema.
- *Técnicas de disipación de calor*: medidas para la disipación de calor del interior del sistema al exterior. Hay múltiples medidas:
 - *Aprovechamiento de la inercia térmica*: la inercia térmica es una propiedad que muestra la cantidad de calor que puede retener un sistema y la velocidad con la que lo absorbe o libera. Esta propiedad depende de la masa térmica (capacidad potencial de almacenamiento de calor del sistema), del calor específico y del coeficiente de conductividad térmica. Requiere además de una ventilación adecuada. Esto hace que el sistema pueda funcionar como un disipador de calor. El sistema absorbe y almacena calor durante el día y lo devuelve al exterior durante la noche. Algunos ejemplos de materiales con gran inercia térmica o capacidad calorífica pueden ser desde el ladrillo u hormigón (entorno a

400Kcal/m³°C) hasta el adobe, la tierra seca o el granito (500 – 1000Kcal/m³°C).

- *Enfriamiento natural*: ventilación natural durante las noches y enfriamiento por evaporación o fusión son algunos de los métodos más frecuentes.

2.2.1.1. Sistemas evaporativos Pot In Pot

Dentro de este apartado cabría mencionar la tecnología idónea para el desempeño del uso de la evaporación como método enfriador. Aunque existan numerosos sistemas de enfriamiento por evaporación, el precursor y más conocido es el denominado “*Pot in Pot*” que consiste únicamente en dos recipientes concéntricos porosos separados por una capa de arena humedecida y cubiertos por un paño húmedo. La información de este apartado se ha sacado fundamentalmente de [Odesola et al, 2009] y [Neil Noble, 2003].

La alta temperatura exterior provoca la filtración del agua de la arena a través del material poroso hacia el exterior y al evaporarse, toma energía del interior del sistema consiguiendo que la temperatura descienda. En la *Figura 10* se muestra un ejemplo de una vasija Pot in Pot.

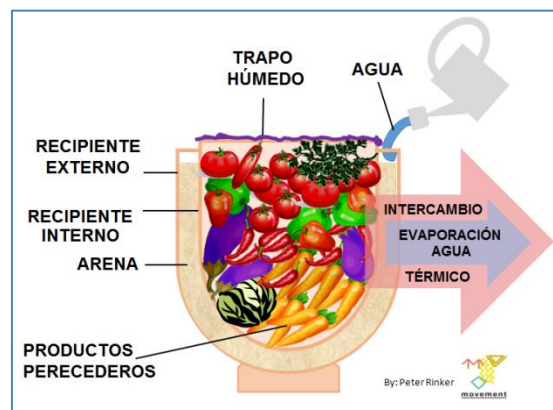


Figura 10 [<https://es.wikipedia.org>. Consultado: 2/05/18]

Otro ejemplo de sistema de refrigeración por evaporación sería la llamada cámara de enfriamiento estática que se diferencia básicamente del sistema *Pot In Pot* por su estructura estática e inmóvil (no permite el movimiento de la misma) y de mayor

capacidad. Como muestra la *Figura 11*, consiste en una cámara frigorífica formada por ladrillos de arcilla con una cavidad que rodea a la estructura donde se deposita arena que más tarde será humedecida para llevar a cabo el efecto evaporativo. La imagen también muestra un sistema auxiliar de aporte de agua. Aunque no lo muestre la imagen, es muy importante proporcionar al sistema de sombra para protegerlo de la irradiación solar.

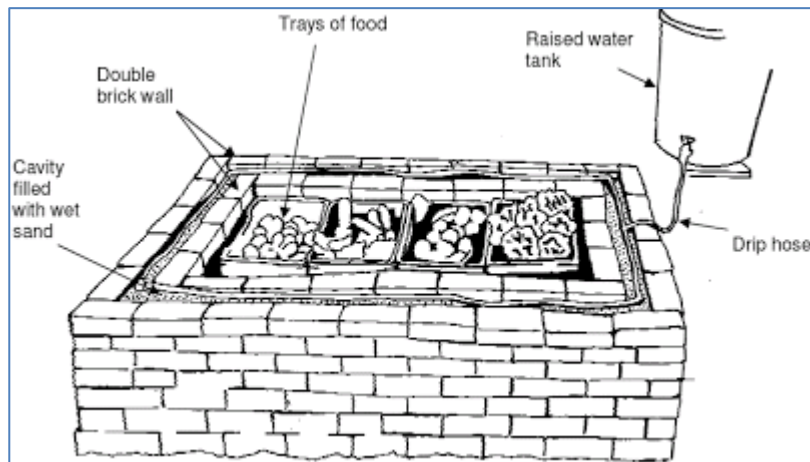


Figura 11[Practical Action]

Existen más variantes de estos sistemas pero con pequeñas modificaciones. En última instancia, todos giran en torno a las mismas características: materiales porosos en contacto con una superficie arenosa húmeda.

Algunas ventajas de estos sistemas son:

- Bajo coste: debido al bajo coste de los materiales para su fabricación y al poco mantenimiento que requiere la tecnología, se convierte en una tecnología idónea para clases sociales con bajo poder adquisitivo.
- Durabilidad: debido a la ausencia de partes móviles y dispositivos electrónicos, es una tecnología que con un trato correcto puede ser muy fiable y duradera.
- No contaminantes: tienen un impacto ambiental muy pequeño en comparación a las tecnologías de refrigeración comúnmente usadas. No emiten gases

perjudiciales a la atmósfera y la arcilla puede reciclarse con su debido tratamiento.

Como se ha comentado en el *Apartado 2.1.1.*, el estudio climatológico es uno de los puntos más importantes y fundamentales a la hora de implantar esta tecnología ya que para que tenga un rendimiento adecuado debe operar en climas lo menos húmedos posibles. Esto definirá completamente la viabilidad del sistema. En la *Tabla 4* se muestra una tabla con medidas de la temperatura interior de un sistema Pot in Pot en función de la temperatura y la humedad relativa del ambiente [Kale et al, 2016].

| Temperatura ambiente (°C) | Humedad relativa (%) | | | | | | | | |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| 10 | 4,0 | 4,5 | 5,5 | 6,0 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 9,0 | 9,5 |
| 15 | 7,5 | 8,5 | 9,5 | 10,5 | 11,0 | 12,0 | 13,0 | 13,5 | 9,5 |
| 20 | 11,0 | 12,0 | 13,0 | 14,5 | 15,5 | 16,5 | 17,5 | 18,5 | 19,0 |
| 25 | 14,5 | 16,0 | 17,0 | 18,5 | 20,0 | 21,0 | 22,0 | 23,0 | 24,0 |
| 30 | 17,5 | 19,5 | 21,0 | 22,5 | 24,0 | 25,0 | 26,5 | 28,0 | 29,0 |
| 35 | 20,0 | 23,0 | 25,0 | 26,5 | 28,5 | 30,0 | 31,5 | 32,5 | 34,0 |
| 40 | 23,0 | 26,5 | 29,0 | 31,0 | 32,5 | 34,5 | | | |
| 45 | 26,0 | 29,0 | 32,5 | | | | | | |
| 50 | 29,0 | 32,5 | 36,5 | | | | | | |

Tabla 4 [Kale et al, 2016]

2.2.1.2. Sistemas de refrigeración por fusión

Estos sistemas se basan en el efecto refrigerador que supone el cambio de fase de una sustancia de estado sólido a líquido. Comúnmente, la sustancia usada suele ser hielo.

La refrigeración por fusión de hielo es uno de los métodos más antiguos empleados para la refrigeración de espacios. Se aprovechaba el hielo de las montañas o de lagos congelados almacenándolo en cuartos muy aislados y procurando disponer de reservas para las épocas más cálidas. Uno de los factores clave para la conservación del hielo era y es el aislamiento del espacio a refrigerar y del propio hielo. Muchas veces se usaba serrín o paja para cubrirlo y ralentizar su fusión. Además, el espacio solía ser un pozo excavado en la tierra. Un ejemplo son los neveros artificiales usados en España, entre otros lugares, desde tiempos de los romanos [Gobierno de Aragón]. Es importante apuntar que la zona climática jugaba un papel fundamental ya que se requería un ambiente en el que haya acceso a nieve o hielo y también era preferible que no se ubicasen en los lugares más cálidos durante el verano. Con el avance del

tiempo, estos métodos quedaron obsoletos con el desarrollo de las tecnologías de compresión mecánica tras la revolución industrial.

Hoy en día, el uso de hielo como refrigerador se ve más orientado a actividades cotidianas que requieren un efecto refrigerador instantáneo tales como el enfriamiento de bebidas y refrescos o aplicaciones médicas no severas (reducción de inflamaciones, anestésico local...).

Un uso muy interesante que se le puede dar al hielo dentro de la refrigeraciones alternativas, es el de batería térmica, es decir, los sistemas que tengan baterías electrónicas convencionales para almacenamiento de energía eléctrica que será usado para alimentar un compresor mecánico y mantener el efecto refrigerador, pueden sustituir esta batería por una formada por hielo, encargado de suministrar frío mediante su fusión.

Sabiendo la capacidad calorífica del hielo, es posible calcular el volumen necesario del mismo si se precisa de la carga térmica a cubrir y de la autonomía requerida por el sistema. Mediante un simple cálculo se puede demostrar que la capacidad de mantener el efecto enfriador es similar al de una batería convencional, basándonos en el volumen y peso de la misma. Tomando como referencia una batería convencional de 12 V y 50Ah, cuyo peso es 13,6Kg y dimensiones 24×17,5×17,5 cm, el contenido de energía disponible de 50Ah se puede calcular como 294MJ/m³. Por otro parte, la capacidad de enfriamiento del hielo es equivalente calor latente del mismo al pasar de estado sólido a líquido que es 333MJ/m³ [SolarChill, 2013].

La conclusión es que la capacidad de enfriamiento de una batería de hielo es un 88% mayor a la de una batería electrónica para el mismo volumen.

2.2.2. Refrigeración activa

Se considera refrigeración activa a la refrigeración de sistemas que conlleva un uso de energía que provenga de una tecnología auxiliar.

2.2.2.1. Sistemas de absorción y adsorción

Los sistemas de refrigeración por absorción y adsorción son aquellos que funcionan gracias a ciclos de absorción y adsorción (*Apartado 2.1.4.*) alimentados por una fuente de calor externa (energía solar térmica, calor residual, combustibles fósiles o biomasa entre otras). La mayor parte de la información de este capítulo ha sido extraída de [NTsoukpoe et al, 2014] y [E.Torrella].

Dentro del mercado de refrigeración, las máquinas de absorción tienen una amplia presencia en comparación con las máquinas de adsorción, debido a su gran madurez. La máquina de adsorción aún es una tecnología joven y en desarrollo. Las aplicaciones de las máquinas de absorción y adsorción están ligadas a la refrigeración de agua en procesos industriales, climatización de espacios y plantas de cogeneración. Algunas características de estas tecnologías son su carácter respetuoso con el medio ambiente (los materiales usados no son contaminantes ni perjudiciales para el medio ambiente, excepto por el residuo al final de la vida útil de la máquina), apenas necesitan uso de electricidad (un mínimo para el control de la unidad y el cambio de válvulas); pocas partes móviles y el no requerimiento de mantenimiento. Por otro lado, requiere un alto grado de estanqueidad y un estudio cuidadoso de los circuitos hidráulicos en el diseño.

Aparte del mercado convencional de refrigeración a escala global, se ha podido comprobar que existen múltiples ejemplos de implantación de sistemas de absorción y adsorción en países subdesarrollados, la mayoría de ellos desarrollados por particulares. Desde finales de la década de 1970, África ha sido el continente donde más estudios y proyectos de sistemas de refrigeración por absorción y adsorción se han llevado a cabo debido a la alta demanda de refrigeración requerida por la población (un quinto de la población no tiene acceso a electricidad) para la conservación de alimentos y a las excepcionales condiciones de irradiación solar (entre 16 y 30 MJ/m² al día). Estas tecnologías han supuesto una alternativa para estos países en vías de desarrollo. Además, como decíamos anteriormente, requieren de poco mantenimiento, lo que las hace realmente atractivas para el autoabastecimiento de comunidades o particulares sin formación específica [NTsoukpoe et al, 2014].

Como se acaba de comentar; uno de los mayores atractivos que presentan estas tecnologías es la gran capacidad que tiene para aprovechar la energía solar y convertirla en calor (alrededor del 95%) [Todd Otanicar et al, 2012]. A pesar de que no todo sea convertido en calor útil debido a las pérdidas e ineficiencias del sistema, las eficiencias de los colectores solares normalmente suelen ser el doble que la de un colector fotovoltaico. La *Figura 12* muestra la cantidad de radiación según longitud de onda aprovechada por los sistemas fotovoltaicos en comparación con los solares térmicos.

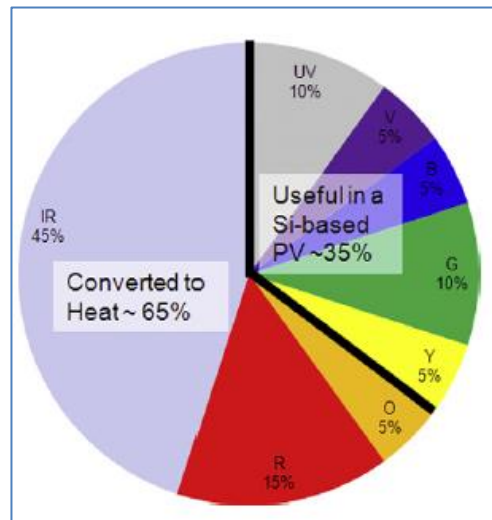


Figura 12 [Todd Otanicar et al, 2012]

Esta eficiencia esta principalmente determinada por su temperatura de trabajo. Temperaturas excesivamente altas resultan en pérdidas de calor hacia el ambiente y conllevan un menor porcentaje de calor aprovechado por el sistema. Por otra parte la temperatura sigue siendo el factor que más influye en el rendimiento por lo que temperaturas relativamente bajas conllevan rendimientos muy inferiores. Los COP típicos suelen ser de 0,7 en máquinas de absorción y desde 0,3-0,7 en adsorción. Son valores bastante bajos, pero siempre que cumplan la función de refrigerar a las temperaturas establecidas, son útiles ya que la energía empleada es gratuita. Esto las hace tener un impacto medioambiental mínimo, comúnmente relacionado solo al residuo que significan al final de su vida útil.

Ambas se asemejan en cuanto a aspectos económicos, residiendo la mayoría del coste en la inversión inicial del colector solar y la cámara frigorífica ($1100\text{€/KW}_{\text{Frío}}$) [Kim et al, 2008].

Aunque los sistemas de absorción y adsorción funcionen con el mismo principio teórico de absorción y adsorción física/química de un fluido y su expulsión gracias a una fuente de calor externa, sus dimensionados, características y rendimientos son muy diferentes.

- **Sistemas de absorción:** los sistemas de absorción pueden ser de simple, doble y hasta triple efecto. Los sistemas multiefecto suponen un mayor aprovechamiento del calor ya que constan de más intercambiadores de calor y generadores para lograr separar ambos fluidos con una menor entrada de calor.

-*Simple efecto:* la potencia frigorífica de los sistemas de estos sistemas gira en torno a 4,5kW con COP de entre 0,6 y 0,75. Las temperaturas requeridas están en el rango de entre 90 y 120°C. Son consideradas máquinas de pequeña y mediana potencia. Actualmente la menor potencia nominal que se ha conseguido es 4,5kW (COP 0,7) por la empresa española ROTARTICA (Figura 13). Otros fabricantes que trabajen en el mercado de máquinas de absorción de baja potencia son Climatewell, Sortech y Sonnenklima. Conforman la mayoría del mercado de refrigeración solar por absorción debido a las bajas temperaturas requeridas.



Figura 13 [Abdul Ghafoor et al, 2015]

-*Doble efecto*: estas máquinas superan los 100kW y sus COP ascienden a 0,9 y 1,33. Las temperaturas de activación oscilan entre los 150 y 180°C. Son consideradas máquinas de alta potencia. Un ejemplo es la Yazaki WFC SC 50 de 175,8KW (*Figura 14*) Otros fabricantes proveedores de máquinas de alta potencia son Broad, Carrier, Thermax, Trane y York.



Figura 14[<http://www.gasklima.de>. Consultado: 23/04/18]

-*Triple efecto*: las enfriadoras de triple efecto siguen todavía en etapa experimental pero existen algunas instalaciones que pueden alcanzar COP de hasta 1,7 operando con temperaturas de entre 170 y 200°C. No obstante, las temperaturas requeridas las hacen inviables para uso en el ámbito de la refrigeración solar. En la *Figura 15* se muestra un gráfico con los principales fabricantes y su cobertura en función de las potencias de las máquinas.

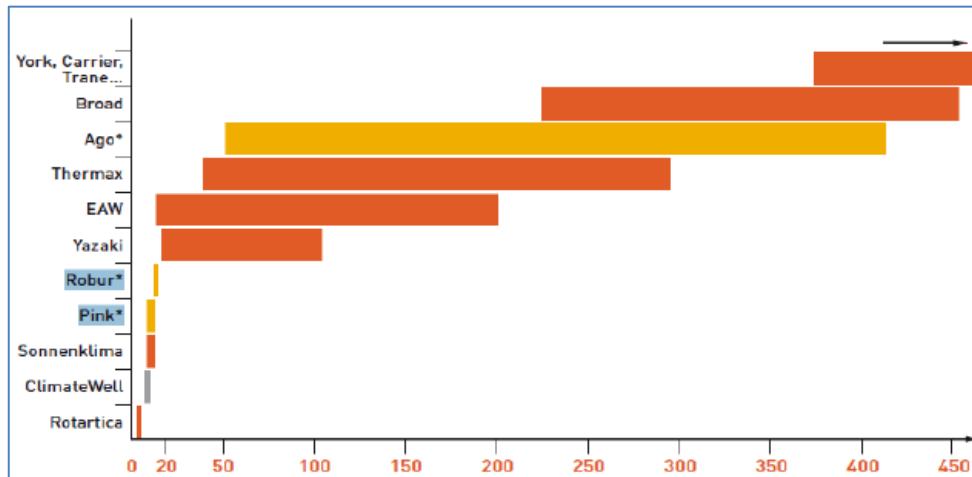


Figura 15 [E.Torrella]

Dentro del ámbito de la refrigeración en zonas aisladas, existen proyectos desarrollados por Universidades o particulares. Es el caso del proyecto ISAAC. Se trata de una instalación compuesta por una máquina de absorción alimentada con energía solar cuyo objetivo es la producción de hielo para la refrigeración de leche (Figura 16). Fue implantada en 2006 en dos aldeas en la costa de Kenia y el proyecto recibió apoyo financiero del Banco Mundial (en uno de sus programas llamado Development MarketPlace). Está diseñada para funcionar sin energía eléctrica y opera en modo de carga durante el día (captación de calor) y descarga durante la noche. Todo el sistema opera controlado por válvulas de control. Se han instalado un total de seis unidades en todo Kenia para distintas cooperativas y el proyecto ha generado en torno a 26.000\$ en 5 meses. Se estima que cuando el proyecto es completamente fabricado en terreno, la instalación puede ser producida por menos de 7000\$ [NTsoukpoe et al, 2014].



Figura 16 [Justin, 2014]

- **Sistemas de adsorción:** Como hemos indicado anteriormente, la máquina de adsorción es una tecnología joven y en desarrollo y por ello, con poca presencia en el mercado y elevado coste. El par de trabajo más común es silica gel-agua. Según el rango de potencias estas máquinas pueden ser de:

-*Baja potencia:* pensadas para aplicaciones domésticas y comerciales, de pequeñas dimensiones y con capacidades de refrigeración de 5,5kW a 15kW. Trabajan a temperaturas cercanas a los 60°C y con COP de entre 0,5- 0,6. Algunos fabricantes son SorTech e Invensor (*Figura 17*) y también existen prototipos diseñados por distintas universidades (Energy Research Centre of the Netherlands y Shangai Jiao Tong University)



Figura 17 [Abdul Ghafoor et al, 2015]

-*Alta potencia:* comercializadas para aplicaciones industriales, de gran tamaño y con capacidades de refrigeración de 70kW a 1300kW. Trabajan a temperaturas cercanas a los 70-90°C y con COP de entre 0,5- 0,6. Algunos fabricantes son Nishiyodo Kuchouki, GBU y Mycom (*Figura 18*).



Figura 18 [E.Torrella]

Dentro del ámbito de refrigeración en zonas aisladas y mayoritariamente, en países subdesarrollados, es muy común encontrar máquinas de absorción o adsorción desarrolladas en terreno y mediante el uso de materiales apropiados. La mayoría tienen el mismo diseño: una superficie de colectores térmicos en la parte superior que conecta en la parte inferior con una cámara que funciona como condensador y más abajo, la cámara frigorífica de almacenamiento. Se muestran algunos ejemplos a continuación.

La Figura 19 muestra el adsorbedor desarrollado por la Universidad de Ibadan en Nigeria. El adsorbedor trabaja con el par metanol-carbón activo. El carbón activo es preparado con huesos de aceituna (desechados en grandes cantidades por la industria del aceite). La superficie de colectores térmicos es de $0,64 \text{ m}^2$ y se llega a lograr un COP de 0,025 para enfriar un contenedor de 1L.

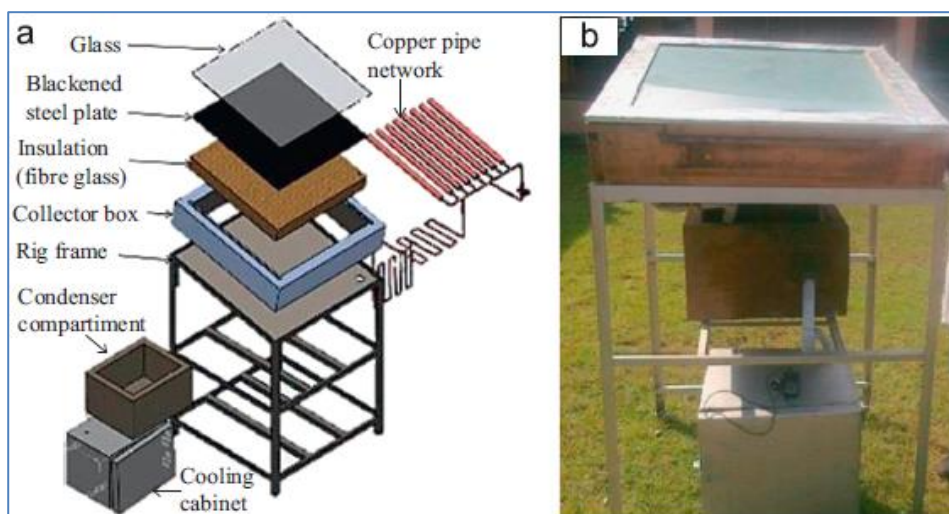


Figura 19 [Justin, 2015]

La Figura 20 muestra el adsorbedor realizado por la Universidad Mohammed V en Rabat, Marruecos. El par de trabajo es metanol y carbón activado y está enteramente construido con materiales locales. Con una superficie de $0,73\text{m}^2$ de colectores térmicos se han logrado unos COP de entre 0,02-0,08 para enfriar una cámara de unos 113L. Se han logrado temperaturas bajo cero.

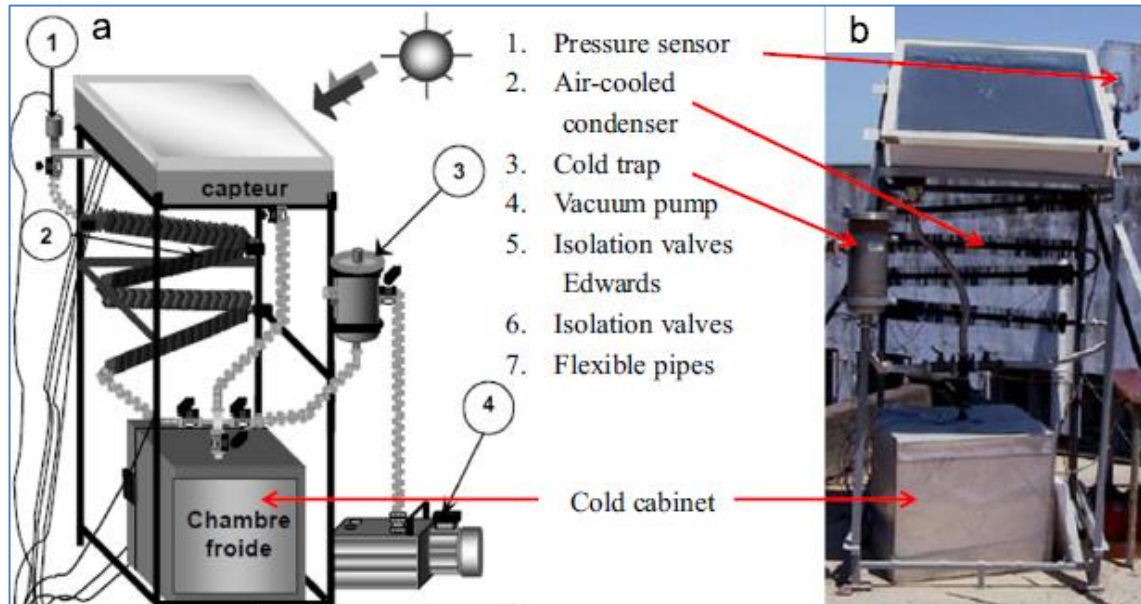


Figura 20 [Justin, 2015]

2.2.2.2. Sistemas termoeléctricos Peltier

La base de estos sistemas radica en el módulo Peltier. Dependiendo de la aplicación, el diseño cambia y estará orientado a sacar el mayor rendimiento al módulo Peltier. La normal general es evitar que el lado frío y el lado caliente de la célula Peltier estén lo menos en contacto posible para evitar pérdidas. La mayor parte de la información de este apartado proviene de [Y.J.Dai et al, 2003].

Algunas ventajas de los sistemas de refrigeración con módulos Peltier son:

- Ausencia de partes móviles y el uso de refrigerante: anulando así problemas mecánicos que puedan generar fatiga, corrosión y derivados. Es una estructura simple y ligera y no requiere de mantenimiento. Además son silenciosos.

- Coste bajo: los módulos Peltier han experimentado una bajada en los precios de coste y fabricación debido a los recientes progresos en el campo termoeléctrico. Además, su funcionamiento no depende de la orientación de los mismos lo que los hace más versátiles.
- Tamaño pequeño: es una característica que los hace muy atractivos para aplicaciones a pequeña escala como por ejemplo, refrigeración de pequeños circuitos, dispositivos electrónicos o fresqueras portátiles de pequeño tamaño. Existen algunos ejemplos de refrigeración termoeléctrica para volúmenes medianos y grandes de cámaras frigoríficas; pero el gran espesor de aislante, el gran número de células Peltier usadas y el gran suministro de corriente eléctrica necesario para lograr la temperatura deseada, lo hace disparatado [Richard L. Field, 1980].

Por otra parte, el COP experimentado por estos sistemas suele ser muy bajo en comparación con los sistemas convencionales de compresión de vapor (0,1 - 0,4) y raramente se han visto prototipos de que lleguen a temperaturas negativas. Esto se puede explicar por varias razones. La primera es que aunque la diferencia de temperaturas teórica que pueden llegar a alcanzar es de 70°K, en la práctica solo se consiguen diferencias de en torno a 20°K. Como se ha comentado anteriormente, esto es debido a la proximidad del lado caliente con el lado frío que hace inevitable que haya transferencia de calor del lado caliente al frío. Por ello, son fundamentales dispositivos de disipación de calor auxiliares tales como ventiladores o fluidos (agua). La segunda es el calor disipado por efecto Joule de la corriente eléctrica (*Apartado 2.1.5*)

En cuanto a aspectos económicos, el coste medio de un sistema Peltier correspondiente a una fresquera de pequeño volumen ronda los 100€ [Kim et al, 2008]. Además, estos sistemas son muy respetuosos con el medio ambiente ya que no generan emisiones contaminantes. El único impacto medioambiental adverso está relacionado con la batería electrónica del mismo y el posterior residuo de esta y del contenedor frigorífico.

La *Figura 21* muestra un ejemplo de una nevera portátil que alimenta un sistema termoeléctrico a partir de un panel fotovoltaico. El diseño está pensado para ser útil a

beduinos que viven en el desierto en partes cercanas a Oman. Mediante una cámara frigorífica de 0,5 L y 6 módulos Peltier, se logra reducir una temperatura de 27°C a 5°C en 44 minutos. El COP registrado es de 0,16. La potencia suministrada es de 15,32 W [Sabah A. Abdul-Wahab et al, 2009].

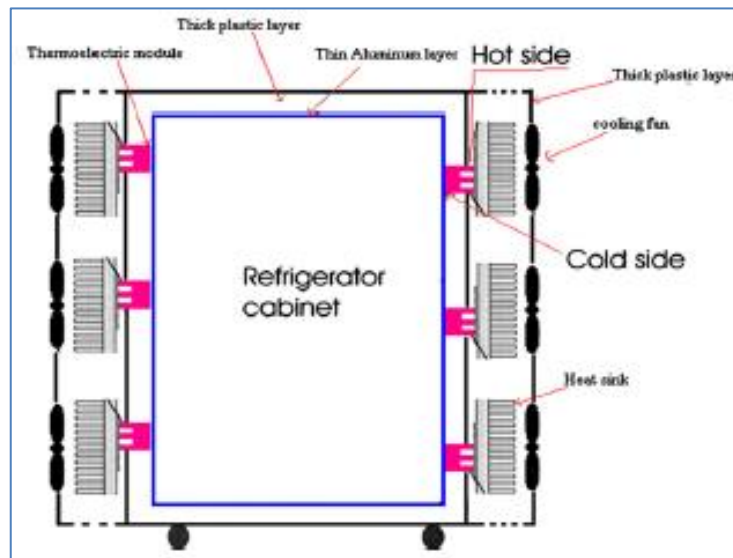


Figura 21[Sabah A. Abdul-Wahab et al, 2009]

2.2.2.3. Sistemas de compresión mecánica

Los sistemas de compresión mecánica son la tecnología encargada de desempeñar el ciclo termodinámico de compresión de vapor. Actualmente es el método convencional que más cabida tiene dentro del mercado de refrigeración. Estos sistemas entran dentro del campo de tecnologías alternativas de refrigeración cuando se modifica la fuente de alimentación del mismo (por paneles fotovoltaicos por ejemplo como se explica más adelante). La mayoría de la información de este apartado está sacada de apuntes de la asignatura Sistemas Térmicos.

Dentro del ciclo de refrigeración distinguimos distintas regiones dependiendo de donde se encuentre el refrigerante y en cada línea se encuentran distintos elementos:

- **Línea de aspiración:** es la parte del circuito que comprende desde la salida del evaporador hasta la entrada del compresor. En ella el refrigerante en fase

vapor es llevado de la presión de baja a la presión de alta. En esta línea encontramos:

1) *Evaporador*: intercambiador de calor donde el refrigerante es evaporado a baja presión proporcionando el efecto enfriador deseado.

2) *Compresor*: dispositivo encargado de aportar trabajo al sistema comprimiendo el refrigerante en fase vapor y a presión de baja de la salida del evaporador hasta la presión de alta. Este proceso es considerado isentrópico.

3) *Recipiente de líquido*: recipiente encargado de recoger el posible refrigerante en fase líquida que pueda no haberse evaporado en el evaporador. Es importante que no entre líquido en el compresor ya que podría generar problemas mecánicos en el mismo.

- *Línea de descarga*: es la parte del circuito que comprende desde la salida del compresor a la entrada del condensador. En ella el refrigerante en fase vapor y a alta presión entra en el condensador. En esta línea encontramos:

1) *Condensador*: intercambiador de calor donde el refrigerante se condensa debido a la cesión de calor a un medio externo, pasando de fase vapor a fase líquida.

- *Línea de líquido*: es la parte del circuito que comprende desde la salida del condensador a la válvula de expansión.

1) *Válvula de expansión (Figura 22)*: dispositivo que genera la caída de presión entre el condensador y el evaporador y regula el caudal másico de refrigerante que llega al evaporador en función de la carga térmica. Para ello, la válvula dispone de un bulbo sensor de temperatura que abre o cierra la válvula en función de la carga térmica. Hay tres fuerzas interactuando en la válvula y se relacionan así:

$$P_{Bulbo} = P_{Muelle} + P_{Evaporador} \quad (2.6)$$

Cuando aumenta la carga térmica, la presión de bulbo aumenta moviendo el muelle hacia abajo y dejando pasar refrigerante hacia el evaporador.



Figura 22 [<http://www.etuyo.com>. Consultado: 2/05/18]

2) *Válvula solenoide (Figura 23)*: dispositivo encargado de controlar el flujo refrigerante. Una vez tenemos la cámara frigorífica a la temperatura deseada, el termostato avisa a la válvula solenoide para cortar el flujo de refrigerante. El presostato para el compresor debido a la bajada de la presión del evaporador. Este proceso es reversible y sucede si la temperatura interior de la cámara frigorífica aumenta.



Figura 23 [<https://www.ecured.cu>. Consultado: 2/05/18]

3) *Visor de líquido (Figura 24)*: la función del visor de líquido es informar del estado del refrigerante a la salida del condensador, más concretamente, avisar si el refrigerante no sale completamente en estado líquido. Se observa cuando se dejan ver burbujas de vapor. Esto puede ser debido a poco subenfriamiento a la salida del condensador, poca carga de refrigerante o que el filtro necesite cambiarse.

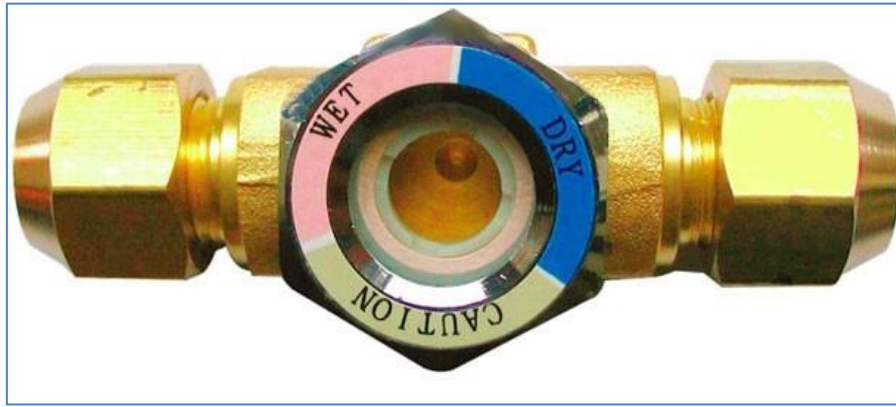


Figura 24[<https://articulo.mercadolibre.com>. Consultado 2/05/18]

4) *Filtro*: dispositivo encargado de la eliminación de agua mediante gel de sílice. El agua descompone el refrigerante y podría congelarse ocasionando problemas en la válvula de expansión. Además elimina partículas sólidas e impurezas.

Estos sistemas son los más eficientes del mercado y logran rendimientos del orden de $COP = 5$. En cuanto a confiabilidad, son sistemas duraderos. Pueden llegar a durar más de 10 años. El sistema refrigerador tiene muy poca probabilidad de sufrir averías por fugas debido a suelen estar sellados de manera muy firme.

El impacto medioambiental de estos sistemas ha sido muy alto debido al uso de refrigerantes clorofluorocarbonados, es decir, refrigerantes que contenían fluor y cloro con un gran potencial destructor de la capa de ozono. Tras la prohibición de los CFC's con el Protocolo de Montreal, otra de las metas era prohibir todos los HCFC's (sustancias sustitutivas de los CFC's debido a su menor toxicidad y persistencia en el medio ambiente) para 2015. Actualmente y según la última instancia del parlamento europeo sobre los gases fluorados de efecto invernadero, se ha establecido un calendario de reducción y de paulatina prohibición de los actuales gases refrigerantes. A partir de 2022, la nueva normativa F-Gas establece la prohibición de la práctica totalidad de los HFC's en frigoríficos e instalaciones de más de 40kW. Por otra parte, el desarrollo y uso de refrigerantes respetuosos con el medio ambiente (como el isobutano), abre la posibilidad de hacer uso de esta tecnología de una manera más responsable. Aun así, la contaminación por el posterior residuo una vez alcanzado la vida útil del sistema y de la batería electrónica y demás dispositivos electrónicos de control son también elementos con un impacto ambiental negativo y considerable.

El desarrollo de los sistemas de refrigeración por compresión mecánica fue un punto de inflexión en la refrigeración moderna, estableciéndose como el método convencional de refrigeración a nivel industrial y familiar. El mercado es muy amplio y debido al desarrollo de compresores de pequeño tamaño, podemos encontrar multitud de dispositivos frigoríficos de todos los tamaños y de todas las potencias, tanto a nivel doméstico y comercial como a nivel industrial (*Figura 25*).



Figura 25 [https://tiendas.mediamarkt.es. Consultado 2/05/2018]

Dentro de la refrigeración en zonas aisladas, estos sistemas han tenido mucha presencia operando con colectores solares fotovoltaicos, encargados de suministrarles energía eléctrica para alimentar el compresor. Tienen un alto grado de dependencia meteorológica debido a la importancia de la cantidad de irradiación solar recibida por los módulos fotovoltaicos. No obstante, los problemas o inconvenientes suelen surgir con el mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas. [Steve McCarney et al, 2013] analiza como de los 6500 refrigeradores solares que UNICEF suministro para zonas aisladas y desabastecidas de red eléctrica, la inmensa mayoría de fallos y averías provenían del sistema fotovoltaico, más concretamente de la batería o del controlador de la misma. Como hemos explicado anteriormente (*Apartado 2.1.2.*), esto ha supuesto que se hayan dado muchos proyectos donde la batería electrónica se ha reemplazado por una batería térmica formada por hielos que sirva para suministrar la energía calorífica necesaria durante los periodos de no captación de energía. Otros fallos se achacaron al mal diseño y bajo mantenimiento de los paneles solares (zonas sombreadas, limpieza de los módulos...). A pesar de esto, son problemas que pueden ser solucionados con un correcto diseño y un buen mantenimiento (que no requiere de personal especializado). Estos sistemas son los más eficientes dentro del ámbito de

refrigeraciones alternativas para zonas aisladas y logran alcanzar rendimientos del orden de $COP = 3$ [Kim et al, 2008].

La gran barrera que presentan es el gran obstáculo que supone la inversión inicial de los módulos fotovoltaicos. Con el paso de los años hemos podido presenciar una bajada considerable de los precios de los módulos fotovoltaicos debido a un aumento significativo de la producción de estos, que hace posible que sea más viable la adquisición de instalaciones fotovoltaicas. En la *Figura 26* se puede apreciar el considerable aumento de la producción de módulos fotovoltaicos desde 2005 hasta 2012. El coste medio de estos sistemas es de $3900\text{€}/\text{KW}_{\text{Frio}}$ [Kim et al, 2008].

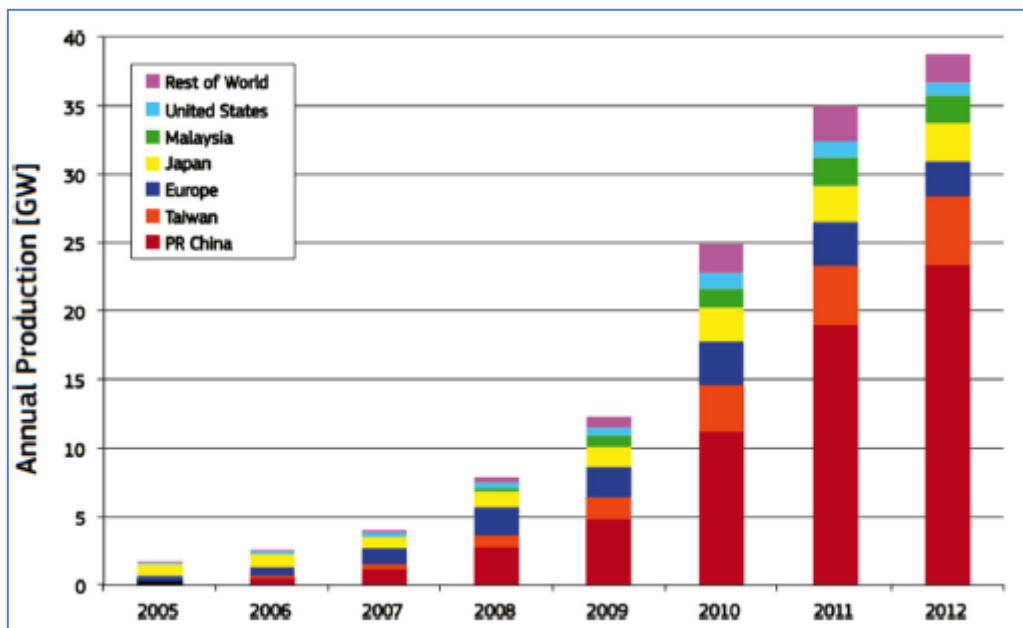


Figura 26 [Steve McCarney et al, 2013]

CAPÍTULO 3. COMPARATIVA DE LAS TECNOLOGÍAS EN FUNCIÓN DEL USO

El objetivo de este apartado es complementar la información recogida en los apartados anteriores acerca de los usos de la refrigeración y los distintos mecanismos y tecnologías de refrigeración, para elaborar un estudio de las tecnologías competentes según el uso dado, analizando sus puntos fuertes y débiles. Además, no se debe olvidar que el ámbito de análisis de este trabajo es el de zonas aisladas por lo que se enfoca teniendo en cuenta todas las restricciones que esto implica.

El parámetro principal de clasificación según el uso es el rango de temperaturas necesario para la correcta conservación del producto. A partir de este punto, se abre un abanico de factores que afectan al diseño y lo moldean según características más concretas del mismo. Algunos factores son:

- Zona climatológica: temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa.
- Nivel de desarrollo: accesibilidad a tecnología, recursos y nivel de ingresos.
- Económicos: coste, inversión inicial y costes de mantenimiento.
- Eficiencia y autonomía: rendimiento y mantenimiento.
- Operatividad: dimensiones y aspectos relacionados con el diseño.
- Confiabilidad y madurez tecnológica: desarrollo y capacidad de desempeño de sus funciones.
- Medioambientales: carácter respetuoso con el medio ambiente, emisiones y residuo posterior.

3.1. Refrigeración de alimentos

Como se indica en la introducción del trabajo, la refrigeración de alimentos comprende un rango de temperaturas de 0-12°C. Esta aplicación de refrigeración es esencial para el desarrollo humano y podemos encontrarla en distintos ámbitos (transporte o almacenamiento de alimentos) y a cualquier escala (a grande, mediana y pequeña escala). Las tecnologías competentes para refrigeración de alimentos son:

- **Sistema de evaporación Pot In Pot**: el rango de temperaturas de estos sistemas los hace viables para refrigeración de alimentos.

Atendiendo a la *Tabla 4* del *Apartado 2.2.1.1.* se puede apreciar que, a humedades relativas bajas, la diferencia de temperaturas es mayor cuanto mayor es la temperatura ambiente. Sucede del mismo modo para humedades relativas altas. No obstante para este último caso, se aprecia que la diferencia de temperaturas es mínima y apenas existe efecto refrigerador. Por lo tanto, la eficiencia del sistema está completamente ligada a la zona climatológica en la que opere. Para conseguir temperaturas entre 0-12°C, la zona climatológica ideal es una zona con temperaturas de entre 15-20°C máximo y con humedades relativas no mayores de los 30-40%.

Esto sería por ejemplo, clima mediterráneo. Aunque se salga del rango de temperaturas óptimo para la refrigeración de alimentos, el dispositivo consigue proporcionar un efecto enfriador en zonas desérticas y zonas semiáridas. Por otra parte, es muy poco recomendable en zonas tropicales.

Esta tecnología es óptima para países en vías de desarrollo y con pocos recursos. Su construcción es sencilla y requiere únicamente de conocimientos artesanales. Solo es necesario acceso a arcilla o barro, un recurso muy común dentro de lo que cabe esperar. Por lo tanto, esta tecnología es apta para cualquier país independientemente de su nivel de desarrollo.

Como se explica en el *Apartado 2.2.1.1.*, es una tecnología muy barata ya que solo supone el coste de la compra de arcilla y fabricación del mismo (esto la hace realmente asequible). A nivel medioambiental es realmente limpia ya que

no genera ningún tipo de emisión perjudicial a la atmósfera y la arcilla puede reciclarse con su debido tratamiento.

Si bien tiene la ventaja de ser versátil ya que ofrece la posibilidad de ser creativo con el diseño (siempre y cuando se respete que el mismo contiene dos elementos concéntricos), a efectos prácticos está realmente pensada para ser un sistema inmóvil. Es decir, a pesar de que se fabrique un modelo Pot In Pot de pequeñas dimensiones (como del tamaño de un botijo, por ejemplo), una vez introducida la arena mojada y todos los alimentos, se hace realmente pesado y difícil de mover. Por lo que no lo hace una tecnología apropiada para el transporte. En cuanto a mantenimiento, requiere administrar periódicamente agua para mantener la tierra húmeda.

Esta tecnología ha sido implantada con éxito para el uso de refrigeración de alimentos en lugares como Sudán, Nigeria e India. Un estudio realizado entre Practical Action y Woman's Association for Earthenware Manufacturing (Asociación de Mujeres para la Fabricación de Artículos de Cerámica) en Sudán, revela la efectividad de los sistemas Pot In Pot a la hora de preservar y aumentar la durabilidad de los alimentos conservados (*Tabla 5*) [Practical Action].

| Produce | Shelf-life of produce without using the Zeer | Shelf-life of produce using the Zeer |
|----------|--|--------------------------------------|
| Tomatoes | 2 days | 20 days |
| Guavas | 2 days | 20 days |
| Rocket | 1 day | 5 days |
| Okra | 4 days | 17 days |
| Carrots | 4 days | 20 days |

Tabla 5 [Practical Action]

- **Conclusión:** la refrigeración de alimentos por refrigeración Pot In Pot está condicionada en mayor medida por la zona climatológica en la que opere (temperaturas 20°C, humedades relativas menores del 40%). Su diseño sencillo hace que esté al alcance de cualquier persona o comunidad pero no está pensada para el transporte de alimentos sino únicamente para su almacenamiento.

- **Sistema de fusión de hielo:** estos sistemas pueden proporcionar las temperaturas requeridas para conservación de alimentos pero están más orientados a servir de sistemas auxiliares (batería térmica) de algún equipo frigorífico que a servir enteramente como sistemas frigoríficos.

Como batería térmica, la autonomía de la misma recae sobre la cantidad de hielo que tengamos. Es sencillo calcular esta cantidad de hielo (*Apartado 2.2.1.2*). A nivel económico y medioambiental el uso de baterías térmicas es muy atractivo ya que es francamente más barato el uso de hielo que la compra de una batería electrónica y mucho más limpio el uso de una sustancia natural como es el agua en estado sólido en lugar de baterías debido a su alto efecto contaminante. Además, son muy atractivas para el transporte de alimentos que requieran refrigeración ya que el hielo supone un pequeño volumen para la cantidad de energía calorífica que suministra. No obstante, la autonomía del sistema está muy condicionada por el continuo suministro de hielo lo que supone un continuo mantenimiento del mismo.

Como se comenta en el *Apartado 2.2.1.2.*, el aspecto climatológico juega un papel importante ya que en zonas cálidas y secas, la carga térmica sobre el sistema frigorífico es mayor y el mantenimiento del hielo es más difícil. Además, la obtención del mismo conllevará un mayor uso de energía, ya sea porque la potencia del sistema que lo genere deberá ser mayor o porque habrá una mayor dificultad de encontrarlo de manera natural.

Las baterías térmicas han resultado ser una buena alternativa que consigue eliminar muchos problemas con los que acarrear los sistemas de refrigeración alimentados por módulos fotovoltaicos. Un ejemplo es el de Nigeria, donde el 75% de las reparaciones efectuadas estaban relacionadas con la batería o con el controlador electrónico de la misma. No obstante, estos sistemas no han estado suficiente tiempo en terreno como para poder decir que son más eficientes que los convencionales que usan baterías electrónicas [Steve McCarney et al, 2013].

- **Conclusión:** los sistemas de refrigeración alimentados por hielo suelen usarse a modo de baterías térmicas auxiliares ya que es muy poco viable mantener un suministro continuo de hielo para cubrir la demanda completa de un sistema frigorífico. Estas baterías térmicas son una alternativa sencilla, limpia y económica a las baterías electrónicas en sistemas de refrigeración por compresión. Además, son transportables lo que las hace verdaderamente útiles para fresqueras portátiles.
- **Sistemas Peltier:** el rango de temperaturas de los sistemas Peltier los hace competentes para refrigeración de alimentos. En general, debido a la poca capacidad de producción de frío de estos sistemas, su uso se ve reducido a pequeños volúmenes de almacenamiento de alimentos (*Apartado 2.2.2.2.*)

Uno de los puntos fuertes de las neveras con módulos Peltier es su operatividad, su pequeño tamaño y su carácter compacto las hace ideales para neveras y fresqueras portátiles. Además no hacen ruido ni están sujetos a vibraciones ya que no tienen partes móviles. Es una tecnología fiable y hay abundante información de su desempeño en terreno. Además la implementación de los módulos Peltier en numerosos dispositivos electrónicos los han hecho habituales en tiendas de electrónica. Luego la facilidad para adquirirlos depende del acceso al núcleo urbano más cercano donde se pueda adquirir uno. Su implementación a una cámara frigorífica es sencilla por lo que no es necesario personal cualificado para el diseño de un prototipo.

Como se comenta en el *Apartado 2.2.2.2.*, los módulos Peltier son realmente baratos pero se ha de tener en cuenta que se necesita una batería electrónica para suministrar corriente eléctrica al módulo y se necesita una fuente de energía eléctrica para cargar el mismo (para zonas aisladas una opción suele ser el uso de módulos fotovoltaicos), lo que encarece el sistema global. La autonomía reside en la capacidad de la batería.

En cuanto al impacto medioambiental, es pequeño, ya que no emite gases perjudiciales a la atmósfera. Aun así, los efectos indirectos contaminantes que suponen la batería, los paneles fotovoltaicos y la célula Peltier una vez alcanzada su vida útil, han de ser considerados.

Un buen ejemplo del uso de estos sistemas como sistemas refrigeradores portátiles es el ejemplo de Chotukool, que nace bajo la premisa de solventar el problema de conservación de alimentos de países como la India (un tercio de los alimentos se echa a perder y se estima que el 80% de los hogares no tiene acceso a un frigorífico). Chotukool (*Figura 27*) es un contenedor de plástico de 45 litros de capacidad alimentado por un sistema de refrigeración termoeléctrico alimentado por una batería de 12 V. La temperatura interior del contenedor oscila entre los 8 y 10°C. Además su precio es de 69\$, lo cual lo hace mucho más accesible para la población rural de países como la India que cualquier otro electrodoméstico convencional.



Figura 27 [Chotukool]

- **Conclusión:** los sistemas frigoríficos con módulos Peltier son una de las opciones más atractivas en cuanto al transporte de alimentos (a pequeña escala) que requieren refrigeración gracias a su sencillez, tamaño, precio y accesibilidad. Por otro lado, su uso para almacenamiento de grandes volúmenes de alimentos queda prácticamente descartado.
- **Sistemas de absorción y adsorción:** los sistemas de absorción y adsorción pueden proporcionar el rango de temperaturas requerido para el almacenamiento refrigerado de alimentos. Ambos sistemas tienen muchas características en común y solo unas pocas diferencias recalables.

Respecto a la operatividad de las mismas, suelen ser máquinas voluminosas (en absorción debido a la torre de refrigeración y en adsorción debido al poco desarrollo tecnológico de la misma) luego no son aptas para el transporte de alimentos refrigerados. No obstante algunos modelos del mercado son de pequeño tamaño aunque muy pesadas para ser pensadas portátiles. Dentro del mercado de absorción no se han desarrollado prototipos de pequeño tamaño debido a la competencia con sistemas refrigeradores portátiles más baratos [NTsoukpoe et al, 2014]. Además, en el caso de adsorción, los colectores solares se deben situar cerca de la cámara frigorífica lo que dificulta su posicionamiento dentro de espacios y comúnmente han de estar en sitios exteriores. Esto puede suponer una ventaja o desventaja según el uso de la cámara frigorífica que almacene alimentos: para una familia que quiera tener los alimentos en su cocina es un impedimento pero para un agricultor que trabaje al aire libre el campo y solo quiera almacenar sus verduras, puede ser una ventaja.

Si bien es cierto que, comúnmente estos sistemas se usan en el ámbito de la climatización de espacios y no directamente para el almacenamiento de alimentos refrigerados y menos en el ámbito doméstico, debido a los rangos de temperaturas en los que operan y a los volúmenes de refrigeración que son capaces de abastecer [Abdul Ghafoor et al, 2015] [Aste et al, 2017].

Ambas se asemejan en cuanto a aspectos económicos, residiendo la mayoría del coste en la inversión inicial del colector solar y la cámara frigorífica ($1100\text{€}/\text{KW}_{\text{Frio}}$) [Kim et al, 2008]. No generan emisiones contaminantes y su impacto medioambiental reside en el posterior residuo tras su vida útil.

Algún ejemplo representativo de estas tecnologías en el campo de la refrigeración de alimentos es el caso del proyecto SOLAREF. Se trata en una máquina de adsorción alimentada por energía solar (*Figura 28*). El objetivo principal es el de crear un refrigerador enteramente construido e instalado por población local con la formación específica para ello. Está diseñado para almacenar comida o vacunas, durante 3 días consecutivos en las condiciones de temperatura más extremas (43°C durante el día y 34°C durante la noche). No requiere de mantenimiento y su coste es de 6000\$ para una capacidad de 70L y 8400\$ para una capacidad de 200L. Aunque SOLAREF ha recibido

algunos premios prestigiosos, en 2010, mostraron su decepción respecto a sus expectativas iniciales, ya que solo se han vendido en torno a 10 refrigeradores en países africanos desde el inicio del proyecto.



Figura 28 [NTsoukpoe et al, 2014]

- **Conclusión:** la refrigeración de alimentos mediante máquinas de absorción o adsorción es posible pero posee algunos inconvenientes que la limitan frente a otras tecnologías como el transporte, debido a sus grandes dimensiones. Cuanto mayor sea el volumen a refrigerar, más económica resulta la apuesta por estas tecnologías. Además, posee una mala adaptabilidad al entorno doméstico (posicionamiento cercano a los colectores solares) y, en el caso de la máquina de adsorción, posee escasa madurez tecnológica.
- **Sistemas de compresión de vapor:** los sistemas de compresión de vapor pueden proporcionar el rango de temperaturas requerido para el almacenamiento refrigerado de alimentos.

La inmensa mayoría de electrodomésticos dedicados a la conservación de alimentos funcionan con sistemas de compresión de vapor. Como se apunta en el *Apartado 2.2.2.3.*, en entornos aislados, la fuente de energía que los alimenta suele ser comúnmente paneles solares fotovoltaicos. Por ello, el aspecto climatológico juega un papel importante ya que el rendimiento del

compresor está condicionado por la energía suministrada por los paneles fotovoltaicos en función de la irradiación solar. Son sistemas duraderos y versátiles ya que hay una mayor disponibilidad de compresores pequeños en el mercado que facilitan así el acceso a refrigeración de pequeños volúmenes. No obstante, este tamaño no es lo suficientemente pequeño como para aplicaciones de transporte de alimentos mediante neveras portátiles [Aste et al, 2017] [McCarney et al, 2013].

La inversión requerida es bastante grande, en gran parte debido al coste de los módulos fotovoltaicos. Además, el mantenimiento de la instalación fotovoltaica juega un papel importante para evitar averías en el sistema (*Apartado 2.2.2.3*).

- **Conclusión:** la refrigeración de alimentos mediante sistemas frigoríficos de compresión de vapor es la tecnología más común y más desarrollada para la preservación de alimentos para medianos y grandes volúmenes. En entornos aislados estos sistemas se usan de manera alternativo al modificar la fuente de alimentación de los mismos, usualmente mediante paneles fotovoltaicos.

3.2. Refrigeración de vacunas

La refrigeración de vacunas comprende un rango de temperaturas de 2-8°C. Como se explica en la introducción del trabajo, el punto fundamental de este tipo de refrigeración recae sobre el control y mantenimiento de la cadena de frío y con ello, la autonomía del sistema que las preserve. Además, el bajo rango de temperaturas con las que opera hace que no sea viable el uso de algunos de los métodos de refrigeración estudiados en el trabajo. Uno de los principales problemas a la hora de implementar tecnologías para la refrigeración de vacunas es su elevado coste que en muchas ocasiones supone una barrera que no es rentable para centros médicos y dispensarios, ya que a veces es más accesible y barato comprar nuevas vacunas que preservar aquellas que se acaban de comprar [NTsoukpoe et al, 2014].

En primer lugar, las tecnologías no aptas para refrigeración de vacunas son:

- **Sistema de evaporación Pot In Pot:** mientras que la simpleza de esta tecnología supone una ventaja desde el punto de accesibilidad de la tecnología a un público mayor, también supone un inconveniente a la hora de, como significa para este uso concreto, mantener un control en todo momento de la temperatura interior del espacio a refrigerar y aportar el frío requerido cuando la temperatura interior aumente. Aunque se dispusiese de un termostato que informase de la temperatura interior, al ser un sistema pasivo, no dispone de energía auxiliar más que la proporcionada por el propio medio que la rodea para bajar su temperatura, luego no sería posible producir llegar a temperaturas más bajas.

Además, la temperatura mínima interior alcanzada es de 4°C para una temperatura ambiente de 10 °C, lo cual la limita a zonas climatológicas cuya temperatura máxima exterior sea 10°C y su humedad relativa sea del 10%. Un ejemplo como el desierto de Atacama en Chile, con la mayor aridez registrada (HR=14%) y cuyas temperaturas máximas rondan los 45°C y mínimas rondan los 0°C, muestra como durante el día no sería posible llegar a la temperatura deseada y durante la noche no haría falta el uso de ninguna tecnología de refrigeración. Luego en estas condiciones es absurdo el uso de esta tecnología.

- **Sistema de fusión de hielo:** la principal característica que hace inviable el uso de este sistema de enfriamiento para el almacenamiento de vacunas es el establecimiento de la temperatura interior en 0°C (temperatura de fusión del hielo), de manera constante. Si bien es cierto que la temperatura de las vacunas no tiene por qué llegar a alcanzar los 0°C debido a que en la práctica existirán pérdidas térmicas, la exposición de las mismas a temperaturas tan cercanas a la temperatura de congelación supone un peligro para su estabilidad y por consiguiente para la salud de las personas que vayan a hacer uso de las mismas.

Por otra parte, las tecnologías competentes para este uso son:

- **Sistemas Peltier:** los sistemas Peltier son capaces de mantener vacunas entre las temperaturas requeridas. No obstante, la variable climatológica juega un

papel fundamental ya que, aunque teóricamente las células Peltier puedan generar una diferencia de temperatura de 70°K, en la práctica esta se reduce a 20°K debido a la transferencia de calor entre el lado frío y el caliente de la célula Peltier, que se hayan muy próximos (*Apartado 2.2.2.2.*). Luego para conseguir temperaturas cercanas a los 2°C, se requieren temperaturas ambiente máximas de menos de 20°C, contando con que el sistema está dotado de disipadores de calor efectivos. Además, el sistema debe ser más complejo que el expuesto en el anterior apartado para refrigeración de alimentos, ya que se requiere de un control del mismo mediante termostatos y reguladores de carga de la batería que alimente la célula Peltier, para evitar la congelación de las vacunas.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el desarrollo de sistemas de refrigeración Peltier para el almacenamiento de vacunas pueden encontrar su espacio, al igual que en la refrigeración de alimentos, en la refrigeración de pequeños volúmenes y por lo tanto transportables. El éxito del dispositivo radicará en lo compacto que se consigan disponer los elementos del sistema electrónico de control, la batería y la célula Peltier y los disipadores. Su accesibilidad económica será también un punto fuerte ya que el sistema de control y batería no tiene por qué ser especialmente caro pero puede haber un aumento de averías y problemas relacionados con este aspecto. Además, la implementación de una batería electrónica hace que estos sistemas sean menos respetuosos con el medio ambiente.

Chotukool está desarrollando prototipos de fresqueras portátiles que logren alcanzar temperaturas cercanas a los 2°C con el fin de almacenar vacunas y mejorar así el acceso a la atención médica (independientemente de la zona climática donde opere) [OMPI].

- **Conclusión:** Cumpliendo todos los requisitos anteriores que exigen un diseño fiable y competente para operar a tales temperaturas, los sistemas de refrigeración Peltier pueden llegar a ser una buena opción para el transporte de vacunas en volúmenes pequeños.

- **Sistemas de absorción y adsorción:** los sistemas de absorción y adsorción son capaces de conseguir las temperaturas requeridas para el almacenamiento de vacunas. Ambas tienen puntos positivos como la ausencia de partes móviles y el poco mantenimiento que requieren. Por otra parte, requieren una inversión inicial grande (en gran medida por el coste de los colectores solares), y no tienen mucha presencia en el ámbito de refrigeración de vacunas ya que son más competitivas en campos como el de la climatización.

-Absorción: las máquinas de absorción tienen distintos rangos de temperaturas según el par de elemento refrigerante-absorbente escogido. En ambos casos hay que poner especial cuidado en el control de la temperatura ya que no se debe llegar a 0°C para evitar la congelación de las vacunas. Además, el par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, corre un mayor riesgo de avería por congelación del agua. Generalmente estas máquinas operan con grandes volúmenes a refrigerar, lo cual descarta su uso en el transporte de vacunas (a pequeña escala) pero son aptas para cámaras frigoríficas grandes.

-Adsorción: a pesar de que en el mercado no figuren máquinas de adsorción que lleguen a estas temperaturas, existen prototipos de particulares que han registrado temperaturas similares a las demandadas. Un ejemplo es un proyecto llevado a cabo por la organización Appropriate Technology Collaborative (ATC) en colaboración con la Universidad de Michigan. El refrigerador opera con etanol y carbón activo como par de trabajo para mantener vacunas en el rango de temperaturas de 8°C. Uno de los motivos para el uso de este par es su fácil obtención: el etanol puede encontrarse en licorerías mientras que el carbón activo se puede conseguir usando cascarás de coco. Cuando no hay disponibilidad de luz solar, el sistema puede trabajar con madera o biocombustibles como fuente de calor. El sistema está pensado para que trabaje sin intervención ni mantenimiento humano. El primer prototipo (*Figura 29*) fue construido por un grupo de 5 estudiantes y fue implementado en Guatemala. Como el ATC muestra y al igual que en las máquinas de absorción (como se comenta en el

Apartado 2.2.2.1.), el volumen de estos sistemas hace que no sean viables para el transporte de vacunas.

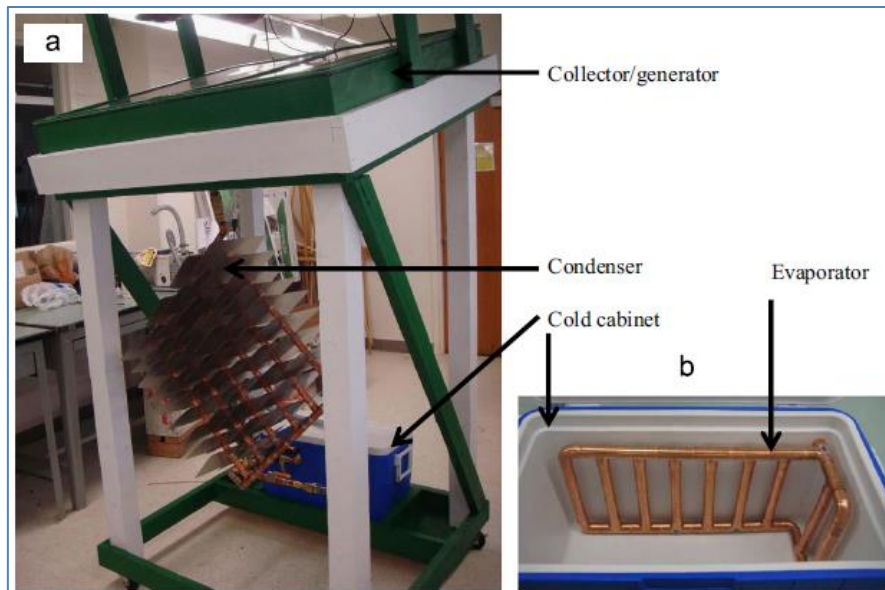


Figura 29[NTsoukpoe et al, 2014]

- **Conclusión:** los sistemas de absorción y adsorción son capaces de almacenar y refrigerar vacunas a las temperaturas deseadas pero no son competitivas debido a su alto coste en relación con los pequeños volúmenes que se requieren para el almacenamiento de estas. No obstante, existen proyectos concretos que nos muestran que son aptas para este uso.
- **Sistemas de compresión de vapor:** los sistemas de compresión de vapor son capaces de proporcionar el rango de temperaturas requerido para el almacenamiento refrigerado de vacunas. Como se apunta en el *Apartado 2.2.2.3.*, en entornos aislados, la fuente de energía que los alimenta suele ser paneles solares fotovoltaicos y la gran versatilidad de compresores presentes en el mercado, hace posible que sean sistemas poco voluminosos. No obstante, los compresores no han alcanzado el tamaño necesario para considerar desarrollar neveras portátiles.

Desde 2005, UNICEF ha suministrado grandes cantidades de refrigeradores por compresión de vapor solares de vacunas a países subdesarrollados (*Figura*

30). A medida que la tecnología ha ido avanzando, se han ido instalando más sistemas con baterías térmicas (solar direct drive) en lugar de baterías electrónicas (battery-powered solar) debido a los inconvenientes y problemas de las baterías electrónicas (*Apartado 2.2.2.3*). Esto refleja el gran uso y el predominio de esta tecnología en comparación con las demás analizadas en el ámbito de la conservación de vacunas en países subdesarrollados.

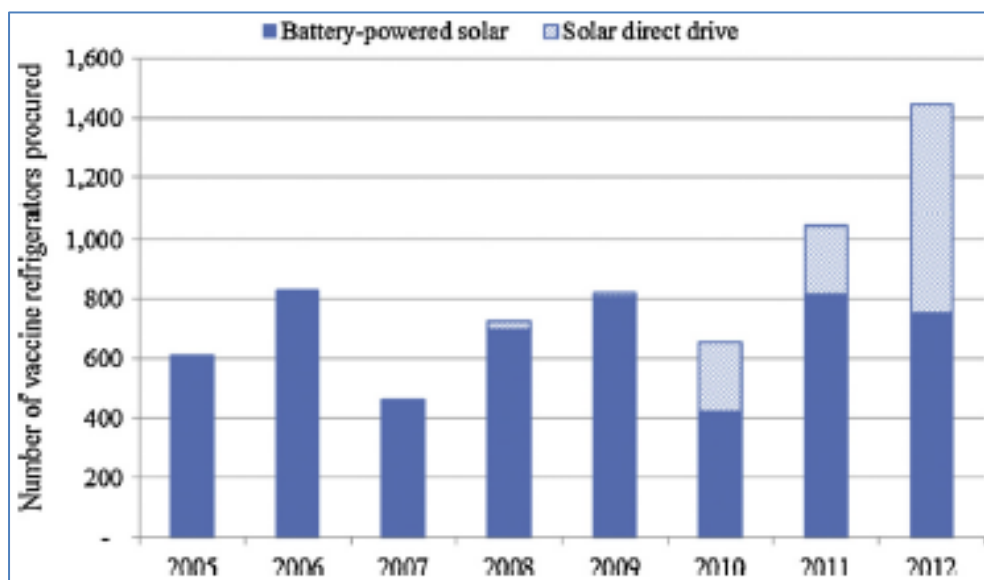


Figura 30 [McCarney et al, 2016]

Uno de los ejemplos más prometedores para refrigeración de vacunas con esta tecnología es el desarrollado por SolarChill (*Figura 31*) un refrigerador para la conservación de vacunas alimentado por energía solar y con batería térmica compuesta por hielos. Este refrigerador tiene además un sistema de control implementado para el control de la temperatura (termostato) y es capaz de mantener la temperatura interior requerida durante 5 días en condiciones desfavorables de irradiación solar y periodos de no captación de energía. El coste de las unidades varía entre los 2400\$ y 7000\$ en función del volumen a refrigerar y teniendo en cuenta el coste de la instalación fotovoltaica. Existen aproximadamente 20000 unidades operando en todo el mundo [Maté][SolarChill].

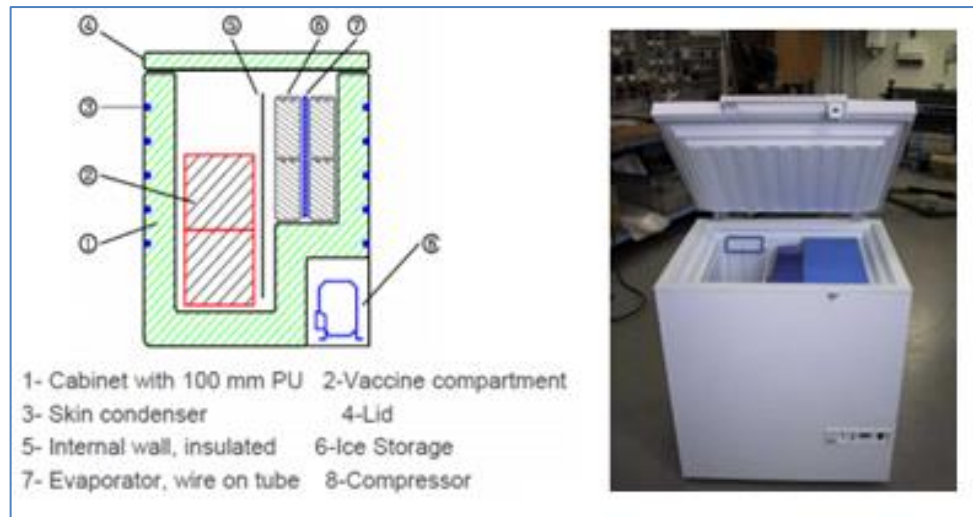


Figura 31[SolarChill]

- **Conclusión:** los sistemas frigoríficos de compresión de vapor alimentados por energía solar son una realidad dentro del campo de la conservación de vacunas en entornos aislados y los posiciona como la principal tecnología competente para este uso.

3.3. Congelación de alimentos:

La congelación de alimentos supone temperaturas por debajo de los 0°C, siendo la temperatura óptima de conservación de los mismos -18°C. Como se comenta en el Apartado 1.1, la diferencia de temperaturas en estos casos suele ser mucho mayor que para la refrigeración por encima de los 0°C luego se requieren tecnologías capaces de suministrar potencias mayores. En primer lugar, las tecnologías no aptas para congelación de alimentos son:

- **Sistema de evaporación Pot In Pot:** es físicamente imposible que un sistema de enfriamiento basado en evaporación de agua consiga temperaturas por debajo de los 0°C.
- **Sistema de fusión de hielo:** estos sistemas no son capaces de congelar alimentos ya que la inmensa mayoría de ellos tienen temperaturas de

congelación por debajo de los -2°C grados y el hielo (en situaciones ideales sin pérdida de calor) se mantiene a 0°C .

- **Sistemas Peltier**: los sistemas Peltier son capaces de lograr temperaturas por debajo de los 0°C pero hay muchas variables implicadas que hacen que esta tecnología no sea apta para la congelación de alimentos.

En primer lugar, las células Peltier pueden generar una diferencia de temperatura de 20°K debido a la transferencia de calor entre el lado frío y el caliente de la célula Peltier, que se encuentran muy próximos (*Apartado 2.2.2.2.*). Esto supone que para alcanzar las temperaturas requeridas de -18°C óptimas para la conservación de alimentos, se requieren temperaturas ambiente máximas del orden de 0°C , es decir, climas extremadamente fríos que solo requieran de un dispositivo auxiliar para mantener la cadena del frío del producto congelado en algunos momentos puntuales en los que la temperatura es mayor. Pero a temperaturas de 0°C , los disipadores de calor (ventiladores) es muy probable que dejen de funcionar y la transferencia de calor entre los lados frío y caliente de la célula Peltier es inevitable y el rendimiento y las temperaturas que pueden alcanzar estos sistemas se ven muy reducidas.

- **Sistemas de absorción $\text{H}_2\text{O-LiBr}$** : como se indica en el *Apartado 2.1.4*, los sistemas de absorción que trabajan con agua como refrigerante no pueden llegar a temperaturas en el evaporador menores que 0°C ya que se congela el refrigerante y se interrumpe el ciclo. Es más, es aconsejable no operar a temperaturas menores de 2°C debido al riesgo de cristalización de la solución.
- **Sistemas de absorción $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$** : las máquinas de absorción que usan el par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ teóricamente pueden alcanzar hasta una temperatura de -60°C (punto de congelación del amoníaco) en el evaporador. Hasta el momento no existen registradas cámaras de congelación alimentadas por este ciclo ya que para conseguir temperaturas tan bajas, requieren temperaturas muy altas en el generador (no pueden ser alcanzadas por energía solar) que necesita de la quema de combustibles fósiles. Estas temperaturas al ser tan altas conllevan unas pérdidas caloríficas muy grandes y el sistema funcionaría con unos COP muy bajos. Además requiere de un mantenimiento constante, haciendo que

uno de sus puntos fuertes que es la falta de mantenimiento se convierta en un inconveniente. Su coste aumenta considerablemente haciendo que su uso para congelación de productos sea inviable.

- **Sistemas de adsorción:** no existen prototipos registrados que alcancen temperaturas negativas del orden de -18°C .

Por otra parte, las tecnologías aptas son:

- **Sistemas de compresión de vapor:** los sistemas de compresión de vapor son los únicos capaces de llegar a temperaturas del orden de -18°C . No obstante, la congelación de productos supone una gran demanda de energía, por lo que en un entorno aislado y suponiendo que la única fuente de energía para el autoabastecimiento de la cámara frigorífica es una instalación fotovoltaica, es muy probable que se requiera una mayor superficie de módulos fotovoltaicos. Además, el aislamiento de la cámara y el estudio de las condiciones climáticas son un punto fundamental para conseguir sacar el mayor rendimiento posible al congelador.

En este caso no es posible el uso de una batería térmica compuesta por hielos debido a que se requieren temperaturas muy por debajo de los 0°C . Es por ello que se requiere el uso de una batería electrónica para almacenar energía eléctrica durante el día y poder así transferir electricidad al compresor durante la noche en los momentos en los que aumente la temperatura en el interior de la cámara frigorífica.

Como se señala en el *Apartado 2.2.2.3*, la amplia gama de compresores de distinto tamaño permite que se amplíe el rango de volúmenes a refrigerar (grandes y medianos). Aun así, estos sistemas no funcionan a escala pequeña (refrigeradores portátiles) ya que no existen compresores tan pequeños.

En términos generales, este sistema es relativamente complejo y requiere de un mínimo mantenimiento y supervisión para garantizar su correcto funcionamiento. Como se comenta en el *Apartado 2.2.2.3*, la mayoría de

problemas y averías en estos sistemas vienen dados por la batería y por el mal diseño del sistema fotovoltaico.

Todo lo comentado anteriormente afecta al coste total aumentándolo considerablemente: tanto la inversión inicial como los costes de mantenimiento (reparaciones, sustitución de la batería por alcance de vida útil, etc.).

- **Conclusión:** los sistemas de compresión de vapor alimentados por módulos fotovoltaicos son la única opción viable para la congelación de alimentos ya que son los únicos capaces de alcanzar temperaturas tan bajas. Con un correcto diseño, implementación y mantenimiento de la instalación fotovoltaica se puede conseguir un sistema que logre la conservación a -18°C .

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

El objetivo de este apartado es hacer un breve caso de estudio de una supuesta implementación de una tecnología de refrigeración en una zona aislada. Los aspectos que más se van a desarrollar son los relativos a refrigeración ya que es el eje central de este trabajo. Este apartado pretende mostrar a grandes rasgos el dimensionamiento del sistema de refrigeración.

En primer lugar se explica el uso y las condiciones de la aplicación a llevar a cabo. Una vez establecida la tecnología con la que se va a operar, se lleva a cabo el estudio de la carga térmica a la que hará frente el dispositivo de refrigeración y se establece el espesor del aislante necesario de la cámara frigorífica. En última instancia, se analiza la inversión y los costes de la implementación del sistema.

El título del caso de estudio es “Nevera para uso particular de un refugio situado en zona alejada de núcleos urbanos alimentada por energía solar y con batería térmica en lugar de batería electrónica convencional”. El estudio que corresponde al dimensionamiento fotovoltaico es escueto ya que, como se explica anteriormente, el trabajo está orientado a refrigeración y no a sistemas fotovoltaicos.

4.1. Descripción del entorno y necesidades a cubrir

En primer lugar se ha de definir las condiciones del entorno en el que va a operar el sistema y las necesidades a cubrir por el mismo para su correcto dimensionado. Se requiere un sistema refrigerador (nevera) para uso particular de un refugio en una zona situada en Extremadura, España. El principal uso que se le va a dar es conservación de alimentos. Algunos parámetros indispensables a la hora del dimensionamiento son:

- **Clima:** el clima de la zona es de tipo mediterráneo, es decir, veranos secos y muy cálidos e inviernos largos y suaves.
- **Aislamiento de la zona:** más concretamente, el sistema refrigerador estará ubicado en una zona cuyo núcleo urbano más cercano (30km) es Galisteo, municipio de Cáceres, Extremadura. El refugio pretende alcanzar el mayor grado de autoabastecimiento posible (en términos de necesidades básicas como energéticos y alimenticios), minimizando al máximo la necesidad de obtener recursos que provengan de fuera debido a su aislamiento. El refugio se encuentra habitado por una sola persona (agente forestal).
- **Factores económicos:** la entidad que adquirirá el sistema refrigerador pretende apostar por la inversión en tecnología que pueda rendir a largo plazo. Se requieren soluciones duraderas.
- **Características del almacenamiento a refrigerar:** se requiere la nevera para almacenar y conservar comida. El volumen a refrigerar no es especialmente grande, el necesario para conservar comida para el uso cotidiano. Es decir, no es una cámara de almacenamiento de comida para largos periodos sino que los alimentos son renovados cada poco tiempo. Por otra parte, al ser un refugio, el sistema refrigerador y todos sus componentes auxiliares deben seguir un diseño lógico y adaptable a un entorno doméstico.
- **Impacto ambiental:** a ser posible, la nevera debe ser lo más respetuosa posible con el medio ambiente debido a la exposición natural en la que se encuentra el refugio.

4.2. Descripción dispositivo refrigeración

El sistema completo de refrigeración alimentado por energía fotovoltaica se puede dividir en dos bloques fundamentales: sistema refrigerador por compresión de vapor y sistema de captación de energía para alimentación del compresor. Obviamente son dependientes entre sí pero se pueden estudiar como dos bloques independientes.

4.2.1. Sistema de refrigeración por compresión de vapor

En este apartado se estudia todo lo referido al correcto aislamiento del dispositivo, así como los componentes necesarios para la realización del ciclo de compresión de vapor y la batería térmica necesaria para mantener la temperatura del sistema en situaciones en las que no hay irradiación solar. Se supone un contenedor de 290L de capacidad con unas medidas de 66cm × 66cm × 66cm.

4.2.1.1. Aislamiento: cálculo del espesor aislante y de la carga térmica

Para la nevera propuesta, se calcula el espesor de aislante requerido para el correcto dimensionamiento de la nevera y la carga térmica que determinará la potencia nominal del equipo de enfriamiento.

El aislante elegido es poliuretano por su baja conductividad ($k= 0,02$). Para ello se calcula el circuito térmico teniendo en cuenta todas las resistencias térmicas implicadas y las temperaturas y el flujo de calor con el que operamos. El flujo de calor que atraviesa una superficie en régimen estacionario y a cuyos lados existen temperaturas distintas viene dado por la fórmula:

$$q'' = \frac{\Delta T}{Rt} \quad (5.1)$$

El circuito térmico correspondiente al sistema es el mostrado en la *Figura 32*.

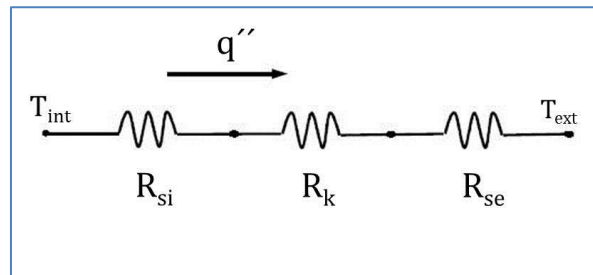


Figura 32

Donde:

- T_{int} = temperatura interior de la nevera
- T_{ext} = temperatura exterior de la nevera
- q'' = flujo de calor (por metro cuadrado)
- R_{si} = resistencia térmica superficial interior
- R_{se} = resistencia térmica superficial exterior
- R_k = resistencia térmica poliuretano

El flujo de calor será la carga máxima de transferencia de calor para máquinas frigoríficas, definida por la **UNE-EN ISO 12241:2012**, que es $q'' = 6 \text{ W/m}^2$. La temperatura interior de la nevera elegida es $T_{int} = 0^\circ\text{C}$ mientras que la exterior es $T_{ext} = 25^\circ\text{C}$ [IDEA, 2010].

Para el cálculo de resistencias térmicas superficiales interiores y exteriores tomamos los valores indicados por la **UNE EN ISO 10 456:2001** (Tabla 6). Dependiendo de si la superficie son las paredes laterales de la nevera, la tapa superior o la base, las resistencias tomarán diferentes valores.




| Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en $\text{m}^2\text{K/W}$ | | |
|--|------|------|
| Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor | Rse | Rsi |
| Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo horizontal  | 0,04 | 0,13 |
| Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente  | 0,04 | 0,10 |
| Cerramientos horizontales y flujo descendente  | 0,04 | 0,17 |

Tabla 6 [Apuntes Sistemas Térmicos]

Aplicando la ecuación (5.1) podemos obtener el espesor deseado para cada superficie:

- Cálculo espesor paredes laterales:

$$R_{\text{Lateral}} = R_{\text{se}} + R_{\text{si}} + \frac{e}{k} = 0,04 + 0,13 + \frac{e}{0,02} = 0,17 + \frac{e}{0,02}$$

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\Delta T}{0,17 + \frac{e}{0,02}}$$

$$e = 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}$$

- Cálculo espesor base:

$$R_{\text{Lateral}} = R_{\text{se}} + R_{\text{si}} + \frac{e}{k} = 0,04 + 0,17 + \frac{e}{0,02} = 0,21 + \frac{e}{0,02}$$

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\Delta T}{0,21 + \frac{e}{0,02}}$$

$$e = 0,0806 \text{ m} = 8,06 \text{ cm}$$

- Cálculo espesor tapa nevera:

$$R_{\text{Lateral}} = R_{\text{se}} + R_{\text{si}} + \frac{e}{k} = 0,04 + 0,1 + \frac{e}{0,02} = 0,14 + \frac{e}{0,02}$$

$$q'' = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\Delta T}{0,14 + \frac{e}{0,02}}$$

$$e = 0,0792 \text{ m} = 7,92 \text{ cm}$$

Los espesores son similares por lo tanto se escoge el mayor ($e = 8,06 \text{ cm}$) para todas las caras de la nevera para así cumplir con los requisitos y minimizar el coste de fabricación.

Para el cálculo de la carga térmica calculamos todas las cargas térmicas involucradas en el entorno a refrigerar, es decir, en la nevera.

- *Carga térmica por renovación de aire*: carga térmica que usualmente significa un aumento de temperatura en el interior del espacio a refrigerar por infiltraciones de aire, normalmente cuando se abren las puertas de este.

$$Q_{\text{Renovación}} = V \cdot \rho \cdot N \cdot \Delta h \quad (5.2)$$

Donde:

$$V = 66\text{cm} \times 66\text{cm} \times 66\text{cm} = 287496 \text{ cm}^3 = 287,5 \text{ dm}^3 \approx 290$$

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad del aire)}$$

Para el cálculo de N atendemos al número de renovaciones por día para nuestro volumen (*Tabla 7*), obteniendo $N = 4,8$.

| Volumen (m³) | Renovaciones por día (n/d) | | Volumen (m³) | Renovaciones por día (n/d) | |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|----------------------------|-----------|
| | Temp <0°C | Temp >0°C | | Temp <0°C | Temp >0°C |
| 2,5 | 52 | 70 | 100 | 6,8 | 9 |
| 3 | 47 | 63 | 150 | 5,4 | 7 |
| 4 | 40 | 53 | 200 | 4,6 | 6 |
| 5 | 35 | 47 | 250 | 4,1 | 5,3 |
| 7,5 | 28 | 38 | 300 | 3,7 | 4,8 |
| 10 | 24 | 32 | 400 | 3,1 | 4,1 |
| 15 | 19 | 26 | 500 | 2,8 | 3,6 |
| 20 | 16,5 | 22 | 600 | 2,5 | 3,2 |
| 25 | 14,5 | 19,5 | 800 | 2,1 | 2,8 |
| 30 | 13,0 | 17,5 | 1.000 | 1,9 | 2,4 |
| 40 | 11,5 | 15,0 | 1.500 | 1,5 | 1,95 |
| 50 | 10,0 | 13,0 | 2.000 | 1,3 | 1,65 |
| 60 | 9,0 | 12,0 | 2.500 | 1,1 | 1,45 |
| 80 | 7,7 | 10,0 | 3.000 | 1,05 | 1,05 |

Tabla 7 [Apuntes Sistemas Térmicos]

Para la diferencia de entalpías necesitamos las humedades y temperaturas interiores y exteriores para identificar las entalpías en el diagrama psicrométrico. Los datos son los siguientes:

$$T_{\text{int}} = 0^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ext}} = 25^\circ\text{C}$$

$$HR_{\text{int}} = 90\% \text{ (dato genérico para equipos de refrigeración).}$$

$$HR_{\text{ext}} = 37\% \text{ (relativa a un día de verano a } T_{\text{ext}} = 25^\circ\text{C) [AEMET, 2018].}$$

Atendiendo al diagrama psicrométrico (Figura 33):

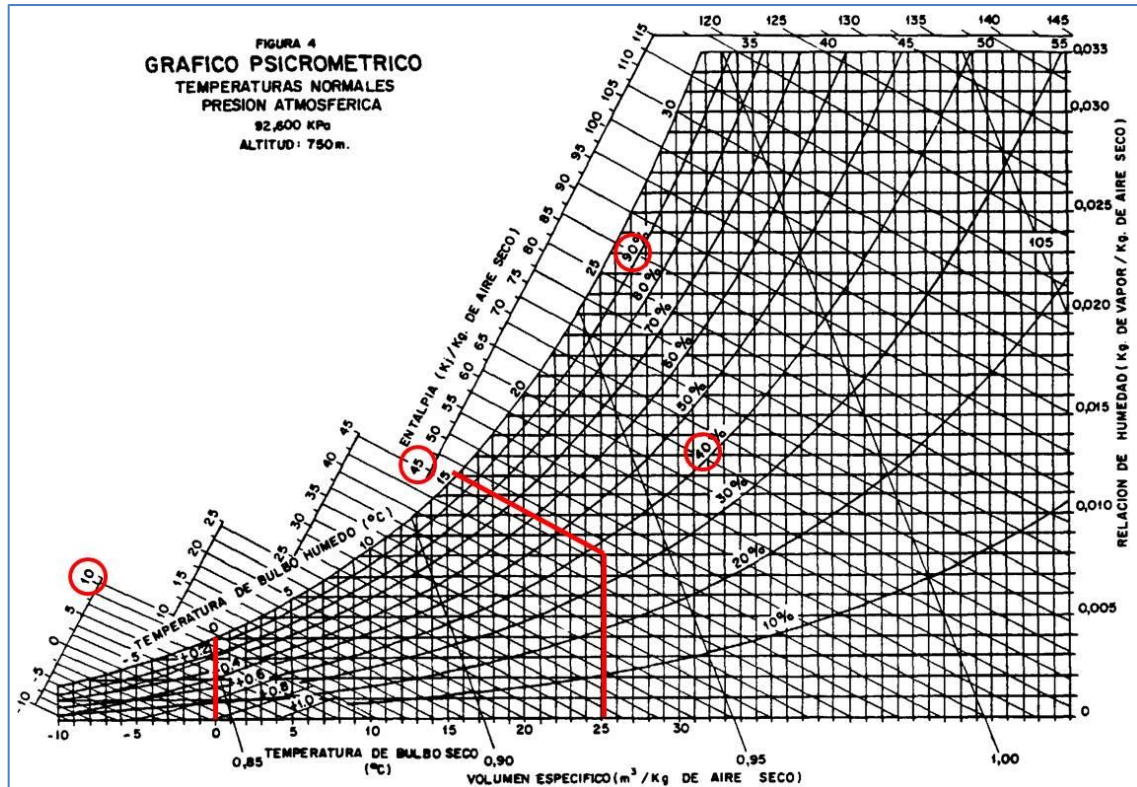


Figura 33 [Apuntes Sistemas Térmicos]

Luego:

$$h_{\text{ext}} = 45 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{\text{int}} = 10 \text{ KJ/Kg}$$

$$Q_{\text{Renovación}} = V \cdot \rho \cdot N \cdot \Delta h = 0,29 \cdot 1,225 \cdot 4,8 \cdot (45 - 10) \cdot (24 \cdot 3600)^{-1} = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ kW}$$

- *Carga térmica por productos almacenados y sus respectivos embalajes:* carga térmica ocasionada por el calor desprendido por los productos. Para el cálculo de esta carga supondremos que el producto es carne y que disponemos de 10 Kg al día.

$$Q_{\text{Producto}} = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \quad (5.3)$$

$$Q_{\text{Embalaje}} = 0,1 \cdot Q_{\text{Producto}} \quad (5.4)$$

Donde:

$$C_p = 0,8 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} = 3,34 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$$

$$m = 10 \text{ Kg/día}$$

$$T_{\text{int}} = 0^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ext}} = 25^\circ\text{C}$$

Aplicando la ecuación (5.3) y (5.4):

$$Q_{\text{Producto}} = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) = 10 \cdot 3,34 \cdot (25-0) \cdot (24 \cdot 3600)^{-1} = 9,66 \cdot 10^{-3} \text{ kW}$$

$$Q_{\text{Embalaje}} = 0,1 \cdot Q_{\text{Producto}} = 0,1 \cdot 9,66 \cdot 10^{-3} = 9,66 \cdot 10^{-4} \text{ kW}$$

- *Carga térmica por iluminación:* carga térmica de la luz interior de la nevera que se activa al abrir la puerta de la misma.

$$Q_{\text{Iluminación}} = n \cdot W_{\text{Iluminación}} \cdot 1,25 \cdot t/24 \quad (5.5)$$

Asumimos que con el uso de una bombilla será suficiente. Estimamos el número de veces que se abre la nevera en un día asumiendo que los periodos de mayor actividad en la cocina son por la noche. También a la hora de la comida. Si a la hora de la comida es razonable abrir la nevera unas 4 veces durante 5 s, para la noche suponemos el doble; 8 veces.

Luego:

$$n = 1$$

$$W_{\text{Iluminación}} = 15 \text{ W}$$

$$t = (4+8) \cdot 5 = 60 \text{ s} = 1 \text{ min} = 0,016 \text{ h}$$

Aplicando la ecuación (5.5):

$$Q_{\text{Iluminación}} = n \cdot W_{\text{Iluminación}} \cdot 1,25 \cdot t/24 = 1 \cdot 15 \cdot 1,25 \cdot 0,016/24 = 0,0125 \text{ W}$$

- *Carga térmica por transmisión:* carga térmica transmitida al ambiente por la superficie de la nevera.

$$Q_{Transmisión} = q'' \cdot A_{Paredes} \quad (5.6)$$

Donde:

$$q'' = 6 \text{ W/m}^2$$

$$A_{Paredes} = 0,66 \cdot 0,66 = 0,4356 \text{ m}^2$$

Aplicando la ecuación (5.6):

$$Q_{Transmisión} = q'' \cdot A_{Paredes} = 6 \cdot (6 \cdot 0,4356) = \mathbf{15,68 \text{ W}}$$

Una vez calculadas todas las cargas, la carga total se calcula como:

$$Q_{Total} = Q_{Renovación} + Q_{Productos} + Q_{Embalaje} + Q_{Iluminación} + Q_{Transmisión} \quad (5.7)$$

Sustituyendo en (5.7):

$$Q_{Total} = 0,69 + 9,66 + 0,966 + 0,0125 + 15,68 = \mathbf{27 \text{ W}}$$

La carga final que definirá la potencia nominal del evaporador y con ello la del compresor se calcula como:

$$Q_{Final} = 1,1 \cdot Q_{Total} \quad (5.8)$$

Luego:

$$Q_{Final} = 1,1 \cdot Q_{Total} = 1,1 \cdot 27 = \mathbf{29,71 \text{ W}}$$

El compresor deberá suministrar una potencia equivalente a 30 W.

4.2.1.2. Elementos ciclo de refrigeración y refrigerante

El esquema de la nevera lo muestra la *Figura 34*. En él se pueden observar los distintos componentes del sistema y su disposición.

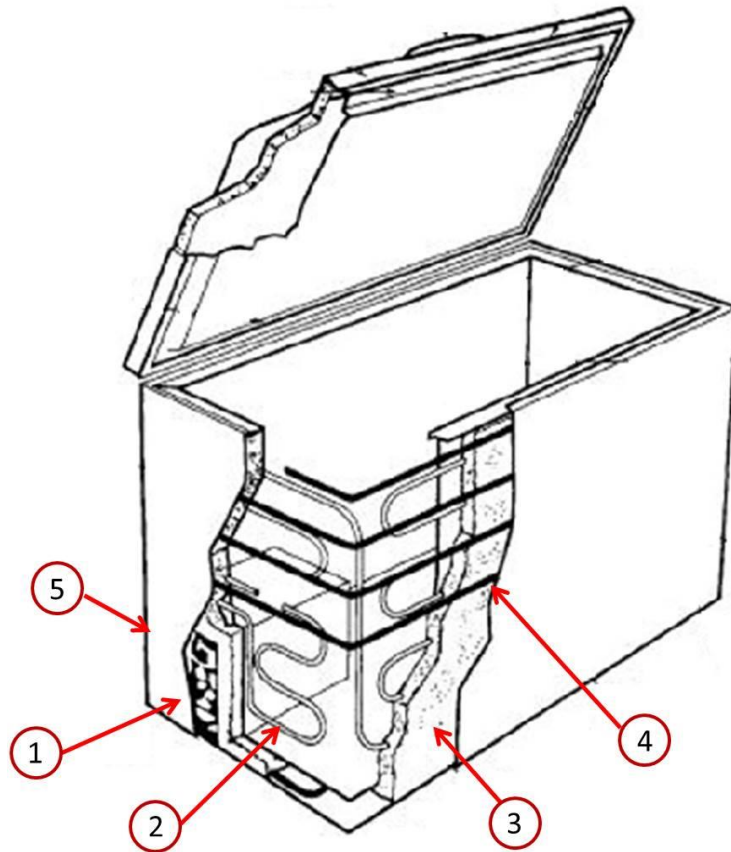


Figura 34

1. *Compresor*: el compresor elegido es el BD35K (*Figura 35*), un compresor de corriente continua que usa refrigerante R600a (isobutano) y que está diseñado para aplicaciones solares. Este compresor tiene un sistema de control integrado que permite que el compresor pueda ser conectado directamente a los paneles fotovoltaicos sin necesidad de un controlador externo o capacitor. Además, el compresor tiene un sistema de optimización adaptativa (AEO) con el cual ajusta siempre su velocidad a la demanda de refrigeración (de 2000 a 3500 RPM). Si los paneles fotovoltaicos no consiguen suministrar suficiente corriente, el compresor para y vuelve a comprobar un minuto después la disponibilidad de corriente. El compresor admite un voltaje entre 10-24V y

necesita una corriente de 4,5 A para comenzar a trabajar y acto seguido puede trabajar a 2A [SolarChill, 2013].



Figura 35 [Danfoss]

2. *Evaporador*: se encuentra integrado en la parte interior del contenedor frigorífico para maximizar el efecto frigorífico
3. *Aislamiento de poliuretano*: 6,7cm de espesor (Apartado 5.3.1.1)
4. *Condensador*: alojado en la parte más externa del contenedor frigorífico
5. *Válvula de expansión*: alojada en el compartimento del compresor para evitar que haya dispositivos en contacto con los alimentos.

Como se ha señalado anteriormente, el refrigerante empleado es R600a (isobutano). Este refrigerante es un hidrocarburo no halogenado, no tóxico, pero altamente inflamable. Su temperatura de deslizamiento es de 0°C y su temperatura de ebullición a 1,013 bares es de -12°C [Gas Servei].

No contribuye al efecto invernadero ya que no contiene cloro (ODP=0). Además, su potencial de calentamiento atmosférico es muy bajo GWP=3 (Global Warming Potential). Esto significa que en 100 años la emisión de un millón de toneladas de R600a es equivalente a emitir 3 de CO₂.

4.2.1.3. Batería térmica

Como hemos explicado anteriormente, la batería del sistema consiste en una batería térmica formada por hielo. Durante períodos de no captación de energía (comúnmente por la noche y en días poco claros), el hielo almacenado suministra la energía calorífica necesaria para mantener la temperatura interior requerida.

Para la nevera propuesta calculamos la cantidad de hielo necesaria para poder lograr una autonomía de 72h (3 días). Esta autonomía ha sido elegida por tanteo, es decir, primero se calculó la cantidad de hielo necesaria para lograr 24h de autonomía del sistema. Al ver que el espacio requerido para el hielo era mínimo, se amplió la autonomía a 72h, quedando un espacio razonable del contenedor dedicado al almacenamiento de hielo.

El calor necesario para mantener la temperatura interior es:

$$Q_{\text{Final}} = 30 \text{ W} = 30 \text{ J/s} \cdot 60 \text{ s} \cdot 60 \text{ min} \cdot 72 \text{ h} = 7,776 \text{ MJ} \quad (5.9)$$

El calor latente suministrado por el hielo es

$$Q_{\text{Hielo}} = 333 \text{ MJ/m}^3 \cdot V_{\text{Hielo}} \quad (5.10)$$

Por lo tanto, si igualamos ambos calores podemos obtener el volumen de hielo necesario:

$$Q_{\text{Final}} = Q_{\text{Hielo}} \quad (5.11)$$

$$7,776 \text{ MJ} = 333 \text{ MJ/m}^3 \cdot V_{\text{Hielo}}$$

$$V_{\text{Hielo}} = 0,023351 \text{ m}^3 = 23,35 \text{ dm}^3 = 23,35 \text{ L}$$

Son necesarios 24 L de hielo para poder mantener la nevera a $T_{\text{int}} = 0^\circ\text{C}$ durante 72h sin actividad del compresor.

La manera de disponer el hielo será en cubiteras de hielo, ya que facilitan la formación de hielo, y de manera vertical, es decir, unas encima de las otras y con una separación considerable entre las mismas para facilitar el operar con ellas. Las

cubiteras convencionales tienen huecos de 3cm de lado para cada hielo, luego con un simple cálculo podemos calcular cuantas necesitaremos. Seleccionamos una cubitera estándar de 21 hielos y medidas 25×9×3cm.

$$24L = 3^3 \cdot 21 \cdot N^{\circ}_{\text{Cubiteras}}$$
$$N^{\circ}_{\text{Cubiteras}} = 42,3 \approx 43 \text{ cubiteras}$$

Calculamos el volumen que el compartimento de hielo supondrá respecto del total:

$$V_{\text{Contenedor hielo}} = 43 \cdot 25 \cdot 9 \cdot 3 = 29,025 \text{ L} \approx 29L$$

Es decir, el uso de las cubiteras supone un aumento de 5 litros en el volumen que contendrá el hielo respecto del volumen de hielo necesario para mantener el sistema frigorífico. El volumen del contenedor de hielo supone un 10% del volumen total del frigorífico.

4.2.2. Dimensionamiento sistema fotovoltaico

Como hemos explicado anteriormente, al estar el trabajo orientado a refrigeración y equipos de refrigeración, no se va a detallar el dimensionado del sistema fotovoltaico con exactitud. Se va a explicar el método para llevarse a cabo.

En primer lugar se estima el consumo medio diario de la nevera. La nevera solo opera cuando hay irradiación solar, por lo que se escoge el día con menos irradiación solar (correspondiente al solsticio de invierno) donde se registraron apenas 9 horas de luz [AEMET], para hacer los cálculos en el peor de los casos. Luego el consumo diario sería:

$$C_{\text{Diario}} = Q_{\text{Compresor}} \times h = 30 \cdot 9 = 270 \text{ Wh/día}$$

También tenemos en cuenta que la instalación no trabajará al 100% de rendimiento, luego tiene más sentido que trabaje en torno al 75%. El consumo real necesario quedaría en:

$$C_{\text{Real}} = 270/0,75 = 360 \text{ Wh/día}$$

El siguiente paso será dimensionar la instalación en función de la irradiación solar recibida. Según el CTE (Código Técnico de Edificación), Extremadura se encuentra en la zona V en cuanto a radiación solar global media sobre superficie horizontal (Figura 36). Esto significa que el promedio de radiación solar que recibe es de 5kWh/m^2 (Figura 37).

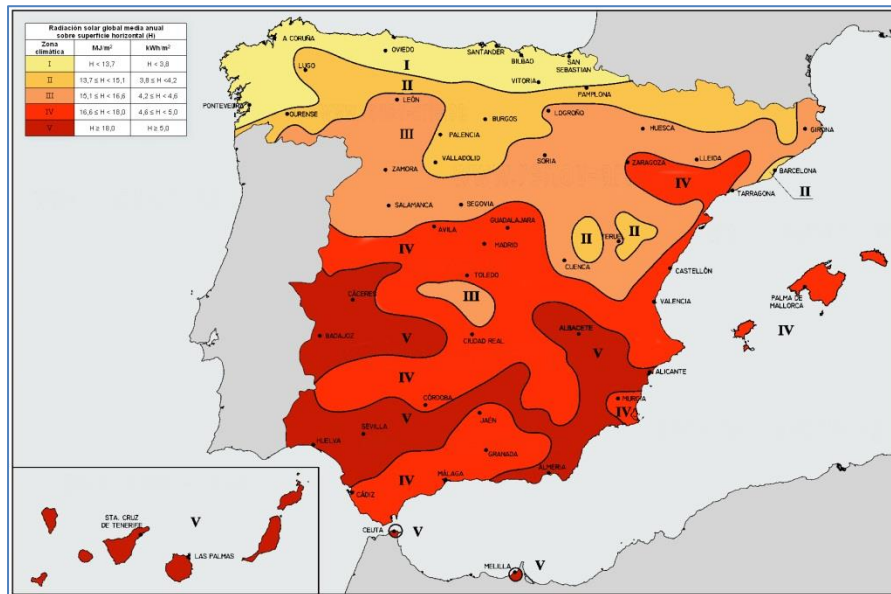


Figura 36 [Apuntes Sistemas Térmicos]

| Zona climática | MJ/m² | kWh/m² |
|----------------|----------------------|--------------------|
| I | $H < 13,7$ | $H < 3,8$ |
| II | $13,7 \leq H < 15,1$ | $3,8 \leq H < 4,2$ |
| III | $15,1 \leq H < 16,6$ | $4,2 \leq H < 4,6$ |
| IV | $16,6 \leq H < 18,0$ | $4,6 \leq H < 5,0$ |
| V | $H \geq 18,0$ | $H \geq 5,0$ |

Tabla 8 [Apuntes Sistemas Térmicos]

Para que la instalación pueda operar en la peor de las situaciones, a la hora de hacer el dimensionamiento es aconsejable dimensionar para las condiciones de irradiación más desfavorables, es decir, el mes con menos irradiación. Así se asegura

que la instalación podrá operar durante el resto de días del año sin problemas. En este caso particular, usamos el dato de 5kWh/m^2 .

La cantidad de horas solar pico (HSP) la obtenemos dividiendo nuestra irradiación solar entre el número de horas a las que debería brillar el sol a una intensidad de 1KW/m^2 constante (ya que su intensidad a lo largo del día varía). Luego $\text{HSP} = 5$.

Suponiendo que usamos unos paneles fotovoltaicos convencionales de 100W, con unas pérdidas típicas del 0,7-0,8, el número de módulos necesarios sería aproximadamente:

$$N = \text{Consumo} / \text{Pérdidas} \times \text{Potencia} \times \text{HSP} = 360 / 0,8 \cdot 100 \cdot 5 = 0,9$$

Luego con un módulo de 100W será más que suficiente.

Al no hacer uso de batería electrónica y al usar un compresor que opera con corriente continua, no se precisa ni de inversor ni de regulador ni baterías de acumulación.

4.3. Costes

Para el sistema de refrigeración propuesto y su instalación fotovoltaica, se establecen unos coste aproximados, en cuanto a inversión y mantenimiento, que puedan servir como idea aproximada. Además, se hace un estudio de los costes si se llegase a producir el prototipo a gran escala, teniendo en cuenta la reducción de costes derivados de la economía de escala.

1. Costes prototipo

Estos costes están divididos en costes de inversión (coste de la nevera y de la instalación solar) y costes de mantenimiento.

a) Costes nevera:

- Compresor DANFOSS BD35K: 490, 76€ [SKH Online Shop].
- Contenedor frigorífico: 128,94€*
- Cubiteras de hielo: $42 \times 2,75\text{€} = 115,5\text{€}$

*Debido a la dificultad para conseguir un coste de contenedor frigorífico sin compresor, se ha usado el coste de un contenedor frigorífico de las mismas medidas que el usado en este apartado y se le ha restado el coste de un compresor que funcione con el mismo rango de potencias que el contenedor frigorífico escogido [Aliexpress][Pepebar].

b) Coste instalación solar:

- Módulo fotovoltaico 100W: 53,62€ [Eco-Worthy].
- Cableado: 10€ (10 metros de cable).

c) Costes de mantenimiento:

- Limpieza módulo fotovoltaicos: 0€ (agua)
- Revisión especializada módulo: 10,724€/año *

*Teniendo cuenta que según [Habitissimo] el precio de la revisión media de una instalación fotovoltaica es 324€ y el precio mínimo 64€ (mayor que el precio de nuestro módulo fotovoltaico), no nos interesa contratar revisiones esporádicas y es más rentable comprar un nuevo panel fotovoltaico en caso de avería. Tendremos en cuenta el periodo de garantía del mismo (5 años [Eco-Worthy]) y supondremos una avería cada 5 años del panel (que implica una compra de panel cada 5 años). Es decir, 10,724€/año en gastos de mantenimiento.

Luego los costes serán:

- $C_{\text{Inversión}} = C_{\text{Nevera}} + C_{\text{Solar}} = 490,76 + 128,94 + 115,5 + 53,62 + 10 = 798,82\text{€}$
- $C_{\text{Mantenimiento}} = 10,724\text{€/año}$

2. Costes producción a gran escala

La inversión económica inicial media de estos sistemas oscilaba entre 2000-6000\$ en 2013 (tiene en cuenta costes de instalación, transporte, equipamiento y técnico de instalación). Si tenemos en cuenta la constante bajada de los módulos fotovoltaicos durante estos años, podemos suponer que el promedio del precio haya bajado considerablemente. No obstante, debido a que es un sistema autónomo que no requiere de otra fuente de energía que no sea el sol (gratuita), se estima que el tiempo promedio de recuperación de la inversión inicial es de 5 a 8 años [SolarChill, 2013].

Actualmente, desde SolarChill, se están desarrollando y estudiando en laboratorio modelos domésticos que se estima que, aunque al principio su precio sea en torno a 1200\$, con economías de escala se reducirá hasta unos 500\$ [Maté].

CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN

En este capítulo se elabora una conclusión relacionada con los capítulos anteriores, con el fin de mostrar si se han cumplido los objetivos del mismo.

Se comentan también algunas vías que el autor considera interesantes que se pueden tomar para el futuro desarrollo e investigación en este campo, así como una opinión personal sobre el tema central que articula el trabajo (las tecnologías de refrigeración alternativas).

Como se plantea al comienzo del trabajo, el objetivo del mismo era el análisis y estudio de mecanismos y tecnologías de refrigeración alternativos para uso de conservación de alimentos, vacunas y congelación de alimentos en zonas aisladas. Uno de los puntos fundamentales del trabajo y que lo puede hacer novedoso, es la clasificación de las distintas tecnologías en función de su uso, es decir, exponer los distintos usos que se van a llevar a cabo y a partir de ahí, analizar cómo se desenvuelven las distintas tecnologías para esa aplicación. Uno de los motivos por los que se lleva a cabo de esta manera la clasificación es el fin de mostrar que cada uso específico tiene distintas características que a veces se ajustan de mejor o peor manera a cada tecnología. Es decir, es necesario analizar al detalle la necesidad para así hacer una mejor elección del método más conveniente para refrigerar, evitando así caer en la generalización.

Por otra parte, aunque el estudio de las tecnologías iba en un principio solo enfocado a su producción en países subdesarrollados, se decidió también dar una pequeña imagen de la situación de cada tecnología dentro del mercado convencional de refrigeración para así dar una visión más completa.

La investigación y estudio para llevar a cabo el trabajo comenzó por el estudio de documentos científicos que trataban temas relacionados con refrigeración solar, refrigeración de vacunas en países subdesarrollados, implantación de sistemas fotovoltaicos en países subdesarrollados o refrigeraciones alternativas a los sistemas de compresión mecánica. Una vez planteados todos los métodos y tecnologías posibles para la refrigeración, se ahondó en el estudio de las mismas para seleccionar las que podrían actuar en entornos aislados. Se estudiaron también proyectos sobre el terreno para no solo estudiar la teoría sino recopilar información sobre la práctica e identificar los principales inconvenientes de cada tecnología. Para la realización del caso de estudio, se emplearon los conocimientos aprendidos en la asignatura Sistemas Térmicos y Energías Renovables, ambas realizadas en el último cuatrimestre del Grado en Tecnologías Industriales.

A la vista del resultado obtenido en el trabajo, se puede apreciar como el terreno de la refrigeración exige altas demandas energéticas y por lo tanto diseños precisos y fiables si se quieren implantar de forma exitosa en zonas aisladas. Además, aunque el papel de los sistemas de refrigeración por compresión mecánica sea muy grande y abarque la mayoría del mercado de refrigeración, se puede constatar la variedad de tecnologías existentes, que muchas veces llegan a ser más útiles que los sistemas

convencionales según la aplicación que se les dé. También es constatable que existen tecnologías, como las máquinas de adsorción, que se encuentran en desarrollo y que pueden llegar a ocupar un papel importante en los próximos años dentro del ámbito de la refrigeración.

Por último, a pesar de la gran cantidad de estudios llevados a cabo en países subdesarrollados y de la gran cantidad de refrigeradores autónomos proporcionados a zonas desabastecidas y de bajo nivel de desarrollo, el problema energético que en gran mayoría afecta a países en vías de desarrollo, no se puede solucionar mediante la intervención puntual, ya sea por agentes locales o extranjeros, en diversas zonas. Esto solo funciona como método paliativo y es importante tener en cuenta la importante responsabilidad que tienen los organismos estatales y de la cual deriva el proporcionar el acceso energético a zonas desprovistas de red eléctrica.

Referencias

A. Allouhi, T.Kousksou, A. Jamil, P.Bruehl, Y.Mourad, Y.Zeraoui. 2015, Solar Driven Cooling Systems: An updated review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 44, pp. 159-181.

Abdul Ghafoor and Anjum Munir. 2015, Worldwide overview of solar thermal cooling technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 43, pp 763-774.

AEP, Comité Asesor de Vacunas, <http://vacunasaep.org/documentos/manual/cap-6> (Consultada 19/05/2018)

Aliexpress, DC48V compressor (130-455W), <https://es.aliexpress.com/item/DC48V-compressor-130W-455W-cooling-capacity-suitable-for-solar-mobile-fridge-and-solar-refrigerator-or-solar/32648496815.html> (Consultado 22/05/2018)

Appropedia, Refrigeration for developing countries, [http://www.appropedia.org/Refrigeration_for_developing_countries_\(original\)](http://www.appropedia.org/Refrigeration_for_developing_countries_(original)) (Consultado 7/02/2018)

Aste, Niccolò, Del Pero, Claudio and Leonforte, Fabrizio. 2017. Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context – A review. Sustainable Energy Technologies and Assessments 22, pp. 150-160.

BLINDER. 2015. La moderna tecnología de refrigeración Peltier ¿Sustituirán los módulos Peltier a los compresores? <https://www.binder-world.com/es/Conviene-saber/Tecnolog%C3%AD-a-Peltier>

Chotukool, <http://www.chotukool.com/> (Consultado 2/02/2018)

Cubiteras de hielo TOPELEK, https://www.amazon.es/TOPELEK-Bandejas-Silicona-Certificado-Herramienta/dp/B074QMNS7N/ref=pd_sbs_79_1?encoding=UTF8&psc=1&refRID=YD4J1WRP0T89BW2V27S5 (Consultado 22/05/2018)

Danfoss BD35K,

http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/06/bd35f_automotive_electronic_unit_101n0600_12-24vdc_08-2011_dehc100m602.pdf (Consultado 23/05/2018)

E.Torrella, Las máquinas de producción de frío por adsorción con la mezcla sílica gel-agua. Universidad Politécnica de Valencia

Eco-Worthy, 100W 12V Polycrystalline Solar Panel, <http://www.eco-worthy.com/catalog/worthy-100w-polycrystalline-solar-panel-p-139.html> (Consultado 22/05/2018)

Gas Servei, <https://www.gas-servei.com/es/fluidos/refrigerantes-hc/r-600a--isobutano-> (Consultado: 12/05/2018)

Gobierno de Aragon, Las neveras y los pozos de nieve o hielo en la comarca de las cuencas mineras, http://www.aragon.es/estaticos/GobiernoAragon/Departamentos/PoliticaTerritorialJusticiaInterior/Documentos/docs/Areas/Informaci%C3%B3n%20territorial/Publicaciones/Colleccion_Territorio/Comarca_Cuencas_Mineras/4+NEVERAS.pdf (Consultado 21/05/2018)

Habitissimo, Mantenimiento placas solares.

<https://www.habitissimo.es/presupuestos/hacer-mantenimiento-placas-solares/madrid> (Consultado 20/05/2018)

IDAE,

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_12_Guia_tecnica_condiciones_climaticas_exteriores_de_proyecto_e4e5b769.pdf (Consultado 10/05/ 2018)

International Energy Agency. 2012. Key World Energy Statistics.

Ioan Sarbu and Calin Sebarchievici. 2013. Review of solar refrigeration and cooling systems. Energy and Buildings 67, pp. 286-297.

ISAAC Solar Ice Maker, <http://www.solaricemaker.com/> (Consultado 21/05/2018)

J.T. Liberty, B.O. Ugwuishiwu, S.A. Pukuma and C.E. Odo. 2014. Principles and Application of Evaporative Cooling Systems for Fruit and Vegetables Preservation. International Journal of Current Engineering and Technology, Vol. 3, No.3.

Kale, S.J., Nath, P., Jalgaonkar, K., Mahawar, M.K. 2016. Low Cost Storage Structures for Fruits and Vegetables Handling in Indian Conditions. Indian Horticulture Journal; 6(3), pp. 376-379.

Kim, D.S. and Infante Ferreira, C.A. 2008. Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. International Journal of refrigeration 31, pp. 3-15.

Maté, Janos, jmate@telus.net “SolarChill Info”[Correo electrónico].23 Mayo 2018. Enviado a pablo.sastron@gmail.com.

Michael J.Moran. 2004. Fundamentos de termodinámica técnica, 2ª edición. Capítulo 10.5, pp. 531-534.

Monografías, Historia de la refrigeración,
<http://www.monografias.com/trabajos81/historia-refrigeracion/historia-refrigeracion.shtml> (Consultada 19/05/2018)

Neil Noble (Practical Action). 2003. Evaporative cooling.
<https://answers.practicalaction.org/our-resources/item/evaporative-cooling> .
(Consultado 10/03/ 2018)

NTsoukpoe, Kokouvi Edem, Yamegueu, Daniel, Bassole, Justin. 2014. Solar sorption refrigeration in Africa. Renewable and Sustainable Energy Reviews 35, pp. 318-335.

OMPI, http://www.wipo.int/wipo_magazine/es/2013/06/article_0003.html (Consultado 21/05/2018)

Organización Meteorológica Mundial. 2017. Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero, N° 13.<https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-aumento-de-la-concentraci%C3%B3n-de-gases-de-efecto-invernadero-alcanza-un>
(Consultado 21/04/2018).

Odesola and Onwuka Onyebuchi. 2009. A Review of Porous Evaporative Cooling for the Preservation of Fruits and Vegetables. Department of Mechanical Engineering, University of Ibadan, Nigeria.

Pepebar, Arcon congelador CH290 ancho 110cm, <https://www.pepebar.com/arcon-congelador-ch290-ancho-110-cm> (Consultado 22/05/2018)

Practical Action, Evaporative Cooling, <https://answers.practicalaction.org/our-resources/item/evaporative-cooling> (Consultado 16/03/2018)

RAI, 2011. Tecnologías para el desarrollo humano de las comunidades Rurales aisladas. Capítulo 2, pp.46-61

Richard L. Field.1980. Photovoltaic/Thermoelectric refrigerator for medicine storage for developing countries, Solar Energy Vol. 25, pp. 445-447.

Sabah A. Abdul-Wahab, Ali Elkamel, Ali M. Al-Damkhi, Is'haq A. Al-Habsi, Hilal S. Al-Rubai'ey'.2009. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. Renewable Energy 34, pp. 30-34.

SKH Online Shop,<https://www.skh-kaeltetechnik.de/Compressor-Danfoss-Secop-BD35K-with-modul> (Consultado 22/05/2018)

Solar Chill Technology, 2013, <https://www.ctc-n.org/sites/www.ctc-n.org/files/resources/solarchill-technology-brief.pdf>. (Consultado 1/05/ 2018)

SOLAREF, http://www.ideassonline.org/public/pdf/br_46_03.pdf (Consultado 21/05/2018)

Steve McCarney, Joanie Robertson, Juliette Arnaud, Kristina Lorensen and John Lloyd. 2013. Using solar-powered refrigeration for vaccine storage where other sources of reliable electricity are inadequate or costly. Vaccine 31, pp. 6050-6057.

Todd Otanicar, Robert A. Taylor and Patrick E. Phelan. 2012. Prospects for solar cooling – An economic and environmental assessment. *Solar Energy* 86, pp. 1287-1299.

Y.J.Dai, R.Z. Wang and L. Ni. 2003. Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells. *Renewable Energy* 28, pp. 949-959.